

Enrique Lacasa Ferrer

Planteamiento y puesta en práctica de una metodología para proyectar el desarrollo de productos sostenibles

Departamento
Ingeniería de Diseño y Fabricación

Director/es
SANTOLAYA SAENZ, JOSE LUIS
AMAVEDA METONOU, HIPPOLYTE

<http://zaguan.unizar.es/collection/Tesis>



Reconocimiento – NoComercial – SinObraDerivada (by-nc-nd): No se permite un uso comercial de la obra original ni la generación de obras derivadas.

© Universidad de Zaragoza
Servicio de Publicaciones

ISSN 2254-7606

Tesis Doctoral

PLANTEAMIENTO Y PUESTA EN PRÁCTICA DE UNA METODOLOGÍA PARA PROYECTAR EL DESARROLLO DE PRODUCTOS SOSTENIBLES

Autor

Enrique Lacasa Ferrer

Director/es

SANTOLAYA SAENZ, JOSE LUIS
AMAVEDA METONOU, HIPPOLYTE

UNIVERSIDAD DE ZARAGOZA
Ingeniería de Diseño y Fabricación

2018



**Universidad
Zaragoza**

Tesis Doctoral

PLANTEAMIENTO Y PUESTA EN PRÁCTICA DE UNA METODOLOGÍA PARA PROYECTAR EL DESARROLLO DE PRODUCTOS SOSTENIBLES

Autor:

Enrique Lacasa Ferrer

Directores:

José Luis Santolaya Sáenz

Hippolyte Amaveda Metonou

UNIVERSIDAD DE ZARAGOZA

Departamento de Ingeniería de Diseño y Fabricación

2018



**Departamento de
Ingeniería de
Diseño y Fabricación
Universidad Zaragoza**

D. **José Luis Santolaya Sáenz**, Doctor Ingeniero Industrial y Profesor Contratado Doctor interino del Departamento de Ingeniería de Diseño y Fabricación de la Universidad de Zaragoza y D. **Hippolyte Amaveda Metonou**, Doctor Ingeniero Industrial y Profesor Contratado Doctor del Departamento de Ciencia y Tecnología de Materiales y Fluidos de la Universidad de Zaragoza.

Informan:

Que la tesis titulada “***Planteamiento y puesta en práctica de una metodología para proyectar el desarrollo de productos sostenibles***” elaborada por D. Enrique Lacasa Ferrer ha sido realizada bajo su dirección, se ajusta al proyecto de tesis inicialmente presentado y cumple con los requisitos exigidos por la legislación vigente para optar al grado de Doctor por la Universidad de Zaragoza.

Una vez finalizada, autorizan su presentación para ser evaluada por el tribunal correspondiente.

Zaragoza, a 17 de abril de 2018

Fdo. D. José Luis Santolaya Sáenz

Fdo. D. Hippolyte Amaveda

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quisiera agradecer, a los profesores de la Universidad de Zaragoza y directores de esta tesis, el Dr. Jose Luis Santolaya Saenz y el Dr. Hippolyte Amaveda Metonou. Gracias, por el trabajo realizado durante estos 4 años, el tiempo dedicado a la realización de los trabajos, a las continuas revisión del documento de tesis y sobre todo, por todas las cosas aprendidas de ellos.

Agradecer también, a las empresas que han aportado datos de alguno de sus productos y procesos, lo que nos ha permitido trabajar con datos actuales y dar más envergadura al trabajo realizado. Y a todas esas personas que de forma directa o indirecta han aportado su grano de arena durante estos años y han dado pie a obtener y mejorar el trabajo realizado.

Finalmente, agradecer a mi familia, todo el apoyo que me han dado, ya no solo durante estos cuatro años, sino durante el largo camino hasta llegar aquí. Y también a Maddy por sus continuos ánimos para conseguir el objetivo.

Este trabajo plantea y pone en práctica una metodología para proyectar el desarrollo sostenible de productos. En primer lugar se revisa el concepto de sostenibilidad y la evolución de las principales iniciativas para hacer frente a sus desafíos. Se muestra el concepto actual formado por tres dimensiones (ambiental-económica-social), su aplicación a la industria y su evaluación y aplicación en el diseño de producto. También se estudian los modelos de desarrollo de producto y los métodos y herramientas que han sido utilizados desde la ingeniería de diseño para integrar la sostenibilidad.

El marco de estudio previo es la base para plantear una metodología que integra la sostenibilidad en los proyectos de desarrollo de producto, incluyendo el análisis y evaluación de cada una de sus dimensiones. Se compone de tres fases: evaluación de la sostenibilidad, rediseño de producto y comparación de diseños. Se aplica un enfoque ingenieril que define métricas ligadas a aspectos técnicos y selecciona indicadores cuantitativos adecuados para evaluar la sostenibilidad en cada una de sus dimensiones. Los límites del sistema se establecen en la etapa de producción.

La metodología se pone en práctica en cuatro casos de estudio. En dos casos de estudio el inventario inicial se obtiene a partir del proyecto de desarrollo de producto y se proyecta su rediseño. En otros dos casos de estudio se parte de los datos que proporciona la instalación productiva y se proyecta su rediseño. Además, en uno de estos casos, se comprueba el resultado sobre la propia instalación. En cada caso, la aplicación sistemática de fases permite proponer alternativas, valorar su idoneidad de acuerdo a las especificaciones del producto y lograr un diseño mejorado teniendo en cuenta el impacto ambiental, la rentabilidad económica y el bienestar social.

As result of this work, a methodology for development of a sustainable product is raised and put into practice. The historical evolution and current status are addressed about sustainable development, its concept (three dimensions), its application on industry and its assessment and application on product design. Besides, a deep study about product design is made, and different methodologies and approaches which have appeared to help to designer have been studied.

As result of this research, a methodology to redesign sustainable products based on the life cycle tool has been developed. This methodology made of three steps: sustainability assessment, product redesign and design comparison, allows applying and assessing alternatives of design with metrics and indicators of sustainability.

This methodology is applied to 4 different products it has allowed to check the appropriate sequence of phases proposed to achieve an improved design taken into account the three sustainability dimensions. In the case of study is made an assessment in detail of the product, its characteristics and its specifications, giving place to elaborate the product inventory. Some redesign alternatives are proposed and the suitability is evaluated for each alternative from sustainability indicators. Finally, metrics and indicators obtained are compared between initial and redesign product.

During this work, metrics and indicators used for each case study are described, because they are an important part in the more appropriate alternative selection.

“Si logramos nuestros metas de sostenibilidad pero nadie nos sigue, habremos fallado”

Paul Polman

Índice

Capítulo 1. Introducción al Diseño de Productos Sostenibles.....	1
1.1. La preocupación por el medio ambiente.....	2
1.2. Concepto de desarrollo sostenible.....	5
1.3. Política europea de desarrollo sostenible.....	7
1.4. Ecología industrial.....	9
1.5. Eco-diseño	10
1.5.1. Evaluación del ciclo de vida (LCA).....	11
1.5.2. Herramientas de cálculo.....	11
1.5.3. Metodologías de evaluación de impacto	12
1.5.4. Categorías de impacto y Eco-indicadores.....	14
1.5.5. Estudios de Eco-diseño.....	16
1.5.6. Eco-innovación	18
1.6. Diseño de productos sostenibles	19
Glosario de acrónimos	23
 Capítulo 2. Metodología de Desarrollo de Productos Sostenibles	25
2.1. Modelos de diseño y desarrollo de producto	26
1) Modelo de desarrollo de producto integrado	26
2) Modelo sistemático de diseño en la ingeniería	27
3) Ingeniería inversa y rediseño	28
4) Ingeniería concurrente y diseño para X (DfX).....	29
5) Modelo genérico de desarrollo de producto.....	30
2.2. Desarrollo sostenible de producto. Métodos y herramientas	32
2.2.1. Aplicación de criterios medioambientales	32
A) Herramientas de análisis y evaluación ambiental	33
B) Herramientas de mejora ambiental.....	36
C) Herramientas que integran requerimientos	39
2.2.2. Aplicación de criterios sostenibles.....	42

2.3. Metodología para proyectar el desarrollo de productos sostenibles	45
2.3.1. Etapas de la metodología	45
2.3.2. Métricas ingenieriles	47
2.3.3. Indicadores de sostenibilidad	50
Glosario de acrónimos	55
Capítulo 3. Casos de Estudio	57
Caso 1 - seguidor solar	58
Características y especificaciones del producto	58
Proceso de rediseño sostenible	60
Fase 1a - Evaluación de la sostenibilidad (diseño inicial)	60
Fase 2 - Rediseño de producto	64
Fase 1b - Evaluación de la sostenibilidad (rediseño)	65
Fase 3 - Comparación de diseños	67
Caso 1 - Conclusiones	71
Caso 2 - contenedor isoterma	73
Características y especificaciones del producto	73
Proceso de rediseño sostenible	75
Fase 1a - Evaluación de la sostenibilidad (diseño inicial)	75
Fase 2 - Rediseño de producto	78
Fase 3 - Comparación de diseños	82
Caso 2 - Conclusiones	85
Caso 3 - aerógrafo	87
Características y especificaciones del producto	87
Proceso de rediseño sostenible	89
Fase 1a - Evaluación de la sostenibilidad (diseño inicial)	89
Fase 2a - Rediseño de producto (ciclo 1)	92
Fase 1b - Evaluación de la sostenibilidad (ciclo 1)	94
Fase 2b - Rediseño de producto (ciclo 2)	95
Fase 1c - Evaluación de la sostenibilidad (ciclo 2)	96
Fase 3. Comparación de diseños	98
Caso 3 - Conclusiones	102
Caso 4 - leche	103
Características y especificaciones del producto	103
Proceso de rediseño sostenible	105
Fase 1a - Evaluación de la sostenibilidad (diseño inicial)	105
Fase 2 - Rediseño de producto	110
Fase 1b - Evaluación de la sostenibilidad (rediseño)	111
Fase 3. Comparación de diseños	113
Caso 4 - Conclusiones	115

Capítulo 4. Conclusiones	117
4.1. Resumen de resultados	118
4.2. Contribuciones de la tesis	122
4.3. Trabajo de investigación futuro	124
 Referencias	117
 Anexos	117
Anexo C1	117
Anexo C1 - 1. Análisis de alternativas de diseño	139
Anexo C1 - 2. Planificación de operaciones de fabricación	148
Anexo C1 - 3. Cálculo de indicadores ambientales	150
Anexo C1 - 4. Costes de producción	152
Anexo C2	117
Anexo C2 - 1. Listado de componentes y operaciones de fabricación	155
Anexo C2 - 2. Cálculo de indicadores	165
Anexo C2 - 3. Costes de producción	167
Anexo C3	117
Anexo C3 - 1. Componentes y operaciones de fabricación	169
Anexo C2 - 2. Planificación de operaciones de fabricación	193
Anexo C3 - 3. Cálculo de indicadores	195
Anexo C3 - 4. Costes de producción	197
Anexos C4	198
Anexo C4 - 1. Características de la alimentación	199
Anexo C4 - 2. Cálculo de indicadores ambientales	201
Anexo C4 - 3. Costes de producción	203
Anexo C4 - 4. Cálculo de la rentabilidad sobre activos	205

Lista de figuras

Figura 1.1. Datos de temperatura global relativos al periodo pre-industrial (EEA, 2017).....	3
Figura 1.2. Los límites del planeta (Rockström et al., 2009).....	4
Figura 1.3. Interpretaciones sobre el desarrollo sostenible (Hopwood, 2005).....	6
Figura 1.4. Diferentes visiones de la sostenibilidad.	7
Figura 1.5. Fases del ciclo de vida de un producto (ISO 14040).	11
Figura 1.6. Cálculo de indicadores 'midpoint' y 'endpoint' (Goedkoop et al., 2013).....	16
Figura 1.7. Esquema LCSA abordando las tres dimensiones de la sostenibilidad (Finkbeiner et al., 2010).	20
Figura 1.8. Agentes sociales y subcategorías (UNEP/SETAC, 2009).....	21
Figura 2.1. Modelo de desarrollo de producto integrado (Andreasen and Hein, 1987).	26
Figura 2.2. Modelo sistemático de diseño en la ingeniería (Pahl and Beitz, 1996).	27
Figura 2.3. Ingeniería inversa y metodología de rediseño (Otto and Wood, 1999).	28
Figura 2.4. Ingeniería concurrente y Diseño para X (Capuz et al., 1999).	29
Figura 2.5. Fases del proceso de desarrollo de producto (Ulrich and Eppinger, 2000).	30
Figura 2.6. Fases del modelo genérico de desarrollo de producto.	31
Figura 2.7. Desarrollo de la matriz MET (IHOBE, 2000).	34
Figura 2.8. Etapas de desarrollo de un LCA (ISO-14040, 2006a).	35
Figura 2.9. Rueda de LiDS (Brezet and van Hemel, 1997).	37
Figura 2.10. 'The Ten Golden Rules' (Luttropp and Lagerstedt, 2006).....	38
Figura 2.11. Técnica G-QFD (Kuo, 2003).	39
Figura 2.12. Matriz Eco-funcional (Lagerstedt et al., 2003).	40
Figura 2.13. Herramientas que combinan evaluación ambiental e integración de requerimientos (Bovea and Pérez-Belis, 2012).	41
Figura 2.14. Etapas de la guía de diseño para la sostenibilidad D4S (Crul and Diehl, 2009).	42
Figura 2.16. Esquema metodológico para proyectar el desarrollo de productos sostenibles.	46
Figura C1.1. Tipos de seguidores solares.....	58
Figura C1.2. Seguidor solar objeto de estudio - Componentes y características.	59

Figura C1.3. Distribución del impacto ambiental de los componentes del seguidor.	63
Figura C1.4. Distribución de tiempos de procesado y costes de producción de los componentes del seguidor.	63
Figura C1.5. Seguidor solar - Principales cambios introducidos en el producto.	67
Figura C1.6. Seguidor solar - Esquema de producción y resumen de inventario.	68
Figura C1.7. Seguidor solar - Comparación de indicadores de sostenibilidad.	70
Figura C2.1. Tipos de contenedor isoterma.	73
Figura C2.2. Contenedor isoterma - Partes principales, dimensiones y características.	74
Figura C2.3. Distribución del impacto ambiental de los materiales utilizados.	78
Figura C2.4. Distribución de costes de producción y tiempos de procesado de los materiales utilizados.	78
Figura C2.5. Contenedor isoterma - Cambios introducidos en el producto.	82
Figura C2.6. Contenedor isoterma - Esquema de producción y resumen de inventario.	83
Figura C2.7. Contenedor isoterma - Comparación de indicadores de sostenibilidad.	84
Figura C3.1. Estructura interna de un aerógrafo de gravedad y doble acción.	87
Figura C3.2. Aerógrafo - Componentes y características.	88
Figura C3.3. Contribución de los materiales a la sostenibilidad del producto.	92
Figura C3.4. Contribución de diversos factores a la sostenibilidad del producto.	92
Figura C3.5. Aerógrafo - Principales cambios introducidos en el producto.	98
Figura C3.6. Aerógrafo - Esquema de producción y resumen de inventario.	99
Figura C3.7. Aerógrafo - Comparación de indicadores de sostenibilidad.	101
Figura C4.1. Obtención de leche. Esquema de producción y resumen de inventario.	106
Figura C4.2. Distribución de impacto ambiental y costes asociados a materiales y consumos.	109
Figura C4.3. Distribución de tiempos y costes asociados a las actividades productivas.	109
Figura C4.4. Obtención de leche - Comparación de indicadores de sostenibilidad.	114

Lista de tablas

Tabla 1.1. Herramientas de cálculo utilizadas en la realización de un LCA.	13
Tabla 1.2. Categorías de impacto en diferentes metodologías de evaluación de impacto.	14
Tabla 1.3. Área de influencia de categorías de impacto (Stranddorf, 2005).	15
Tabla 1.4. Estudios de impacto medioambiental en desarrollo de producto.	17
Tabla 2.1. Fases de un proyecto de Eco-diseño (Brezet and van Hemel, 1997).	32
Tabla 2.2. Estructura de tareas de la metodología EDIP (Wenzel et al., 1997).	33
Tabla 2.3. Herramientas de evaluación ambiental utilizadas en eco-diseño (Andriankaja et al., 2015).	36
Tabla 2.4. Herramientas de mejora ambiental utilizadas en eco-diseño (Andriankaja et al., 2015).	38
Tabla 2.5. Tareas en un proceso de diseño integrado y sostenible (Gagnon et al., 2012).	43
Tabla 2.6. Cálculo de la masa de producto.	47
Tabla 2.7. Cálculo de la energía consumida en producción.	48
Tabla 2.8. Cálculo de la masa de material desechado.	48
Tabla 2.9. Cálculo de los costes de producción.	49
Tabla 2.10. Cálculo de indicadores ambientales y Bases de Datos utilizadas.	51
Tabla 2.11. Cálculo del valor añadido.	52
Tabla 2.12. Cálculo de la Eco-eficiencia.	52
Tabla 2.13. Cálculo de la Rentabilidad sobre activos.	52
Tabla 2.14. Cálculo del tiempo de trabajo.	53
Tabla 2.15. Cálculo del salario hora.	53
Tabla 2.16. Resumen de métricas ingenieriles e indicadores de sostenibilidad utilizados.	54
Tabla C1.1. Seguidor solar - Diseño inicial. Datos del proceso productivo de cada componente.	60
Tabla C1.2. Seguidor solar - Diseño inicial. Datos del proceso productivo.	61
Tabla C1.3. Seguidor solar - diseño inicial. Coste de la materia prima para cada componente.	61
Tabla C1.4. Seguidor solar - Diseño inicial. Métricas ingenieriles e indicadores de sostenibilidad.	62
Tabla C1.5. Seguidor solar. Alternativas de rediseño.	64
Tabla C1.6. Seguidor solar - Rediseño. Datos del proceso productivo de cada componente.	66

Tabla C1.7. Seguidor solar - Rediseño. Datos del proceso productivo.	66
Tabla C1.8. Seguidor solar - Rediseño. Métricas ingenieriles e indicadores de sostenibilidad.	67
Tabla C2.1. Contenedor isoterma. Especificaciones de diseño.	74
Tabla C2.2. Contenedor isoterma - Diseño inicial. Datos de la materia prima utilizada.	75
Tabla C2.3. Contenedor isoterma - Diseño inicial. Datos del proceso productivo.	76
Tabla C2.4. Contenedor isoterma - Diseño inicial. Métricas ingenieriles e indicadores de sostenibilidad.	77
Tabla C2.5. Contenedor isoterma - Rediseño. Reducción de material.	79
Tabla C2.6. Contenedor isoterma - Rediseño. Utilización de otros materiales.	79
Tabla C2.7. Contenedor isoterma - Rediseño. Datos de la materia prima utilizada.	80
Tabla C2.8. Contenedor isoterma - Rediseño. Datos del proceso productivo.	81
Tabla C2.9. Contenedor isoterma - Rediseño. Métricas ingenieriles e indicadores de sostenibilidad.	81
Tabla C3.1. Aerógrafo - Diseño inicial. Materiales utilizados en la fabricación.	89
Tabla C3.2. Aerógrafo - Diseño inicial. Datos del proceso productivo.	90
Tabla C3.3. Aerógrafo - Diseño inicial. Métricas ingenieriles e indicadores de sostenibilidad.	90
Tabla C3.4. Aerógrafo - Ciclo 1 de rediseño. Reducción del material desechado.	93
Tabla C3.5. Aerógrafo - Ciclo 1 de rediseño. Materiales utilizados en la fabricación.	94
Tabla C3.6. Aerógrafo - Ciclo 1 de rediseño. Datos del proceso productivo.	94
Tabla C3.7. Aerógrafo - Ciclo 1 de rediseño. Métricas ingenieriles e indicadores de sostenibilidad.	95
Tabla C3.8. Aerógrafo - Ciclo 2 de rediseño. Cambio en los materiales.	96
Tabla C3.9. Aerógrafo - Ciclo 2 de rediseño. Materiales utilizados en la fabricación.	97
Tabla C3.10. Aerógrafo - Ciclo 2 de rediseño. Datos del proceso productivo.	97
Tabla C3.11. Aerógrafo - Ciclo 2 de rediseño. Métricas ingenieriles e indicadores de sostenibilidad.	98
Tabla C4.1. Cantidad de nutrientes en 100 g de leche entera de vaca (alimentos.org.es).	103
Tabla C4.2. Alimentación de las vacas - Cantidad de nutrientes recomendados por vaca y día.	104
Tabla C4.3. Obtención de leche. Datos del proceso productivo inicial.	107
Tabla C4.4. Obtención de leche. Datos de materia prima en el proceso productivo inicial.	107
Tabla C4.5. Obtención de leche. Datos de diferentes ingresos ligados a la explotación.	108
Tabla C4.6. Obtención de leche - Diseño inicial. Métricas e indicadores de sostenibilidad.	108
Tabla C4.7. Obtención de leche. Alternativas de alimentación.	110
Tabla C4.8. Obtención de leche. Datos de materia prima en el proceso productivo rediseñado.	111
Tabla C4.9. Obtención de leche. Datos del proceso productivo rediseñado.	111
Tabla C4.10. Obtención de leche - rediseño. Datos de diferentes ingresos ligados a la explotación.	112
Tabla C4.11. Obtención de leche - rediseño. Métricas e indicadores de sostenibilidad en el rediseño.	112
Tabla AC1. 1. Cálculo teórico de parámetros en procesos de fabricación.	140

Tabla AC1.2. Seguidor solar - Proceso de fabricación del mástil.....	141
Tabla AC1.3. Seguidor solar - Análisis de resistencia mecánica del mástil.	141
Tabla AC1.4. Seguidor solar - Proceso de fabricación de los brazos.....	142
Tabla AC1.5. Seguidor solar - Análisis de resistencia mecánica de los brazos.	142
Tabla AC1.6. Seguidor solar - Proceso de fabricación del eje.....	143
Tabla AC1.7. Seguidor solar - Análisis de resistencia mecánica del eje.	143
Tabla AC1.8. Seguidor solar - Proceso de fabricación de la carcasa.....	144
Tabla AC1.9. Seguidor solar - Análisis de resistencia mecánica de la carcasa.	144
Tabla AC1.10. Seguidor solar - Proceso de fabricación del regulador.	145
Tabla AC1.11. Seguidor solar - Análisis de resistencia mecánica del regulador.....	145
Tabla AC1.12. Seguidor solar - Proceso de fabricación del sinfín y de la corona.	146
Tabla AC1.13. Seguidor solar - Análisis de resistencia mecánica de la transmisión.	146
Tabla AC1.14. Seguidor solar - Proceso de fabricación del soporte.	147
Tabla AC1.15. Seguidor solar - Indicadores ambientales unitarios.	150
Tabla AC1.16. Seguidor solar - Indicadores ambientales del diseño inicial	151
Tabla AC1.17. Seguidor solar - Indicadores ambientales en el rediseño	151
Tabla AC2.1. Contenedor isoterma - Diseño inicial. Datos del proceso de fabricación.	156
Tabla AC2.2. Contenedor isoterma - Fabricación Conjunto.	157
Tabla AC2.3. Contenedor isoterma - Fabricación del Subconjunto 0.1 - Conjunto inyectado.....	158
Tabla AC2.4. Contenedor isoterma - Fabricación del Subconjunto 0.2 - Puerta inyectada.	159
Tabla AC2.5. Contenedor isoterma - Fabricación del Subconjunto 0.3 - Bastidor inferior.	160
Tabla AC2.6. Contenedor isoterma - Fabricación del Subconjunto 0.4 - Bastidor superior.	161
Tabla AC2.7. Contenedor isoterma - Fabricación del Subconjunto 0.5 - Chapas techo bañera ..	162
Tabla AC2.8. Contenedor isoterma - Fabricación del Subconjunto 0.6 - Mango.....	162
Tabla AC2.9. Contenedor isoterma - Fabricación del Subconjunto 0.7 - Esquina puerta eje.	163
Tabla AC2.10. Contenedor isoterma - Fabricación del Subconjunto 0.8 - Conjunto eje puerta.	163
Tabla AC2.11. Contenedor isoterma - Fabricación del Subconjunto 0.9 - Gatillo.	164
Tabla AC2.12. Contenedor isoterma - Fabricación del Subconjunto 0.10 - Conjunto mango.	164
Tabla AC2.13. Contenedor isoterma - Indicadores ambientales unitarios.....	165
Tabla AC2.14. Contenedor isoterma - Diseño inicial. Indicadores ambientales	166
Tabla AC2.15. Contenedor isoterma - Rediseño. Indicadores ambientales	166
Tabla AC3.1. Aerógrafo - Capuchón de la aguja. Datos de mecanizado.	171
Tabla AC3.2. Aerógrafo - Cuerpo de la boquilla. Datos de mecanizado.	172
Tabla AC3.3. Aerógrafo - Boquilla. Datos de mecanizado.....	173
Tabla AC3.4. Aerógrafo - Aguja. Datos de mecanizado.	174
Tabla AC3.5. Aerógrafo - Arandela de empaque. Datos de mecanizado.....	175
Tabla AC3.6. Aerógrafo - Tuerca de empaque. Datos de mecanizado.	176
Tabla AC3.7. Aerógrafo - Tapa depósito. Datos de mecanizado.....	177
Tabla AC3.8. Aerógrafo - Palanca. Datos de mecanizado.	178
Tabla AC3.9. Aerógrafo - Oscilador. Datos de mecanizado.	179

Tabla AC3.10. Aerógrafo - Tope-camisa-ajuste. Datos de mecanizado.	180
Tabla AC3.11. Aerógrafo - Eje-muelle. Datos de mecanizado.	181
Tabla AC3.12. Aerógrafo - Camisa-ajuste. Datos de mecanizado.	182
Tabla AC3.13. Aerógrafo - Contratuerca. Datos de mecanizado.	183
Tabla AC3.14. Aerógrafo - Mango. Datos de mecanizado.	184
Tabla AC3.15. Aerógrafo - Tornillo-ajuste. Datos de mecanizado.....	185
Tabla AC3.16. Aerógrafo - Cuerpo-válvula. Datos de mecanizado.	186
Tabla AC3.17. Aerógrafo - Émbolo-válvula. Datos de mecanizado.....	187
Tabla AC3.18. Aerógrafo - Tornillo-fijación. Datos de mecanizado.	188
Tabla AC3.19. Aerógrafo - Tuerca-conector. Datos de mecanizado.	189
Tabla AC3.20. Aerógrafo - Cuerpo aerógrafo. Datos de mecanizado.	190
Tabla AC3.21. Aerógrafo - Indicadores ambientales unitarios.	195
Tabla AC3.22. Aerógrafo - Diseño inicial. Indicadores ambientales.....	196
Tabla AC3.23. Aerógrafo - Ciclo 1 de rediseño. Indicadores ambientales.	196
Tabla AC3.24. Aerógrafo - Ciclo 2 de rediseño. Indicadores ambientales.	196
Tabla AC4.1. Explotación láctea - Composición de diferentes mezclas para alimentación.	200
Tabla AC4.2. Explotación láctea - Indicadores ambientales unitarios.	201
Tabla AC4.3. Explotación láctea - Indicadores ambientales del diseño inicial.	202
Tabla AC4.4. Explotación láctea - Indicadores ambientales del rediseño.	202
Tabla AC4.5. Explotación láctea - Indicadores ambientales de la alternativa.	202
Tabla AC4.6. Explotación láctea – Cálculo de RSA en diseño inicial.....	205
Tabla AC4.7. Explotación láctea – Cálculo de RSA en rediseño.....	205

Capítulo 1.

Introducción al Diseño de Productos Sostenibles

La inquietud que genera actualmente el calentamiento global y los efectos que de él se derivan está presente en la agenda de las Naciones Unidas, en muchos de los debates políticos, en el desarrollo de proyectos industriales y en las inversiones económicas que llevan a cabo las empresas y los gobiernos de los países. Sin embargo, esta preocupación comenzó hace ya algunas décadas donde se comprendió la necesidad de redirigir el concepto de desarrollo teniendo en cuenta no solo el objetivo económico, sino también los objetivos relacionados con el equilibrio ecológico y la justicia social, para afrontar realmente el reto de la sostenibilidad.

Este capítulo introduce el concepto de sostenibilidad y resume las principales iniciativas desplegadas para hacer frente a sus desafíos, a nivel mundial y en el marco político europeo. Muestra las actuaciones planteadas en el ámbito del diseño de producto, basadas principalmente en el Eco-diseño o Diseño para el Medioambiente y la aplicación reciente de criterios que contemplan no solo la dimensión ambiental, sino también aspectos económicos y sociales. Diseñar productos sostenibles es un objetivo muy deseable que requiere la aplicación de herramientas apropiadas que integren todos los elementos, etapas y factores que intervienen en el proceso de diseño y el desarrollo de indicadores adecuados para medir de manera cuantitativa la sostenibilidad.

1.1. La preocupación por el medio ambiente

Los primeros avisos relacionados con la presión que genera la actividad humana sobre el planeta se remontan a Malthus y su publicación *First essay on population* en 1798. En este libro se advierte del conflicto entre una población en ascenso cuyas necesidades materiales no dejan de aumentar y los limitados recursos del planeta. En la década de los 60's del siglo XX, los ecólogos Harding y Ehrlich retoman los postulados de Malthus a la vez que hacen énfasis en el elevado grado de deterioro que está sufriendo el medioambiente. En esta misma época se publica *Silent Spring* (**Carson, 1962**), considerado por muchas personas como el primer libro divulgativo sobre el impacto ambiental. Incide sobre la amenaza que suponen los productos tóxicos y ayuda a sentar las bases para la creación de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA).

En los 70's, con el impulso del Club de Roma (asociación internacional creada por políticos y científicos para abordar los problemas que afectan al mundo) se publica *The limits to growth* (**Meadows et al., 1972**). En este trabajo se utilizan técnicas informáticas para realizar pronósticos sobre las consecuencias de un proceso continuo de crecimiento económico y demográfico, así como de contaminación y agotamiento de los recursos naturales. A pesar de sus limitaciones, ya que el modelo carecía prácticamente de variables sociales o políticas y, por tanto, era solo una descripción parcial de la realidad, produjo un impacto significativo sobre la opinión pública y fue un catalizador importante para todo el movimiento ecologista. Algunos desastres medioambientales, como la contaminación masiva generada por los derrames de buques petrolíferos, ayudó a su vez a impulsar la conciencia ecológica. En 1972 se celebra la primera Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Humano (Conferencia de Estocolmo) se toma la decisión de realizar un seguimiento del estado medio ambiental y de analizar el impacto que sobre medioambiente puede suponer el desarrollo humano. En 1979, la Conferencia Mundial sobre el Clima en Ginebra hace una declaración que exhorta a los gobiernos a prever y evitar los posibles cambios en el clima provocados por el hombre.

En los 80's dos hechos son de especial relevancia: se define por primera vez el término 'desarrollo sostenible' a partir de la publicación de *Our common future* (**WCED, 1987**) y se forma el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC). El trabajo de este grupo de expertos se presenta desde entonces en informes periódicos de evaluación del cambio climático. Determinar cómo están cambiando las variables climáticas, en particular la temperatura, y tratar de comprender las causas que están detrás de sus variaciones, es el objetivo de los investigadores desde hace tiempo. Entre los trabajos científicos se puede destacar el de Charles Kelling que comenzó a realizar mediciones de CO₂ en 1958 en un observatorio astronómico en Hawai, dentro de un entorno que se consideraba especialmente limpio. Sus observaciones a lo largo de varias décadas permitieron comprobar que los niveles de CO₂ aumentaban de manera progresiva. Estas mediciones empezaron a generar alarma en la comunidad internacional y a considerar la necesidad de plantear actuaciones que tuvieran un ámbito global.

El aumento de la concentración de CO₂ y de otros gases genera el efecto invernadero que se considera responsable del incremento de la temperatura a nivel global sobre la superficie de la Tierra. Los registros de temperatura promedio realizados hasta la fecha así lo confirman. En la Figura 1.1 se muestran datos publicados por la Agencia Europea de Medioambiente en 2017 procedentes de cuatro fuentes independientes. Los registros obtenidos a lo largo del s. XX manifiestan un claro calentamiento de la superficie de la Tierra. Se toma como referencia la temperatura correspondiente al periodo pre-industrial.

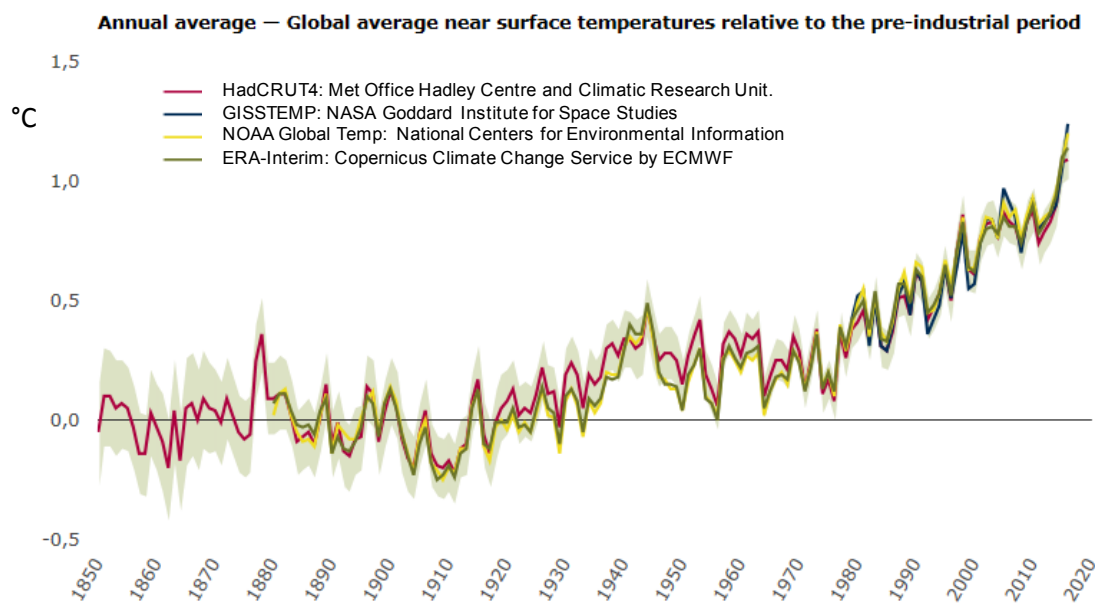


Figura 1.1. Datos de temperatura global relativos al periodo pre-industrial (EEA, 2017).

La urgencia sobre la adopción de medidas para el desarrollo sostenible global, lleva a los líderes mundiales a reunirse en la Cumbre de la Tierra de Rio de Janeiro en 1992 y elaborar la Agenda 21, un programa de acción para luchar en el s. XXI contra el cambio climático, proteger la biodiversidad y eliminar sustancias tóxicas emitidas (**UNCED, 1992**). A partir de 1995 se comienzan a celebrar anualmente las Conferencias Internacionales sobre Cambio Climático (COP). En la COP 3, celebrada en Kyoto (Japón) en 1997, se establece un protocolo donde los países industrializados adquieren compromisos concretos y un calendario de actuación para reducir las emisiones de los gases que más potencian el efecto invernadero. Su puesta en marcha no es fácil y tras 10 años, en la COP 13 celebrada en Bali (Indonesia), después de comprobar que los compromisos de Kyoto no se habían cumplido, se fija una hoja de ruta para lograr una visión común y adoptar acuerdos que puedan ser aplicados por todos los países. En 2009, en la Conferencia de Copenhague se logra fijar en 2°C el valor máximo del incremento de la temperatura media global a lo largo del siglo XXI (en relación al periodo pre-industrial). De acuerdo con el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático esto es necesario para evitar catástrofes climáticas graves.

Rockström et al. (2009) acuñan el concepto de límites planetarios para estimar un espacio operativo seguro para la humanidad respecto del funcionamiento del Sistema Tierra (Figura 1.2). La zona verde representa el espacio de seguridad y los colores rojos la estimación de la posición actual de la variable de control. Según el diagrama tres variables sobrepasan la zona segura. El crecimiento del uso de fertilizantes en la agricultura moderna dio como resultado la transgresión del límite de la interferencia humana con el ciclo global del nitrógeno. En la actualidad, los límites de biodiversidad están superados ampliamente y el cambio climático generado por el incremento de concentración de CO₂ ya es muy alarmante.

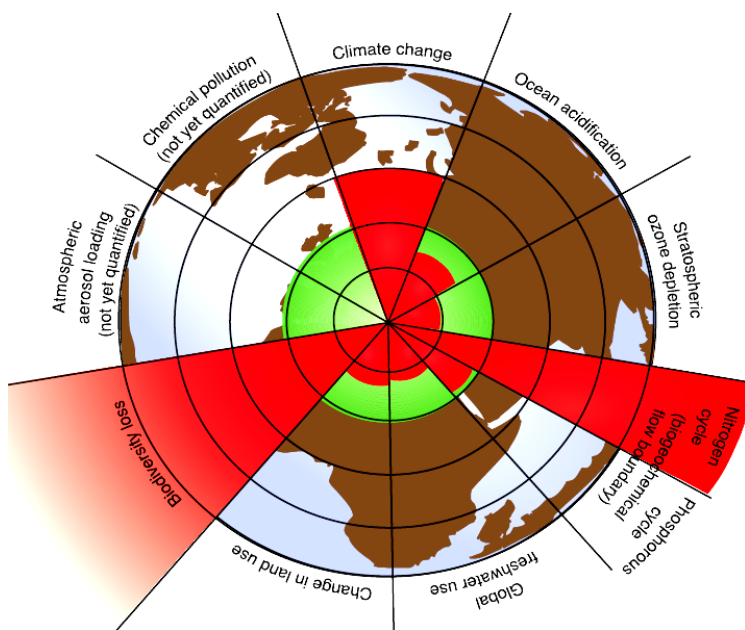


Figura 1.2. Los límites del planeta (Rockström et al., 2009).

Un análisis publicado en 2013 en la revista *Environmental Research Letters* indicaba que el 97% de los artículos científicos publicados por más de 29000 investigadores entre 1991 y 2011 apoya la idea de que el hombre está detrás del calentamiento global. La Conferencia de París (COP 21) en 2015, se presenta como un excelente foro para establecer el marco global de lucha contra el cambio climático. Y de hecho, se logra un acuerdo histórico para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y para promover una transición hacia una economía baja en emisiones. Se convierte en un acuerdo global sin precedentes (195 países) pero no exento de muchas debilidades y cuyo resultado depende de la voluntad y compromiso de actuación de todos los países. Se pone en evidencia que las medidas contra el cambio climático requieren una inversión en un nuevo modelo económico que trate de romper la asociación entre crecimiento y expulsión de carbono a la atmósfera y que favorezca el bienestar de las personas y proteja el medio ambiente. La dimensión global del problema hace necesario la colaboración entre las naciones, de manera que los países en desarrollo tengan acceso y cuenten con los avances tecnológicos que ya están poniendo en práctica de manera progresiva otros países más desarrollados.

1.2. Concepto de desarrollo sostenible

El término 'desarrollo sostenible' aparece por primera vez en el debate político internacional en 1980, introducido por el grupo de trabajo Estrategia para la Conservación del Planeta, dependiente del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UNEP). Sin embargo, no llega a establecerse hasta que la Comisión dirigida por G.H. Brundtland publica el informe *Our Common Future* (**WCED, 1987**). En este documento se define desarrollo sostenible como:

“Aquél que satisface las necesidades actuales de las generaciones presentes sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades”.

El informe analiza y replantea las políticas de desarrollo económico globalizador y pone el foco de atención en el elevado coste medioambiental que tiene los avances sociales. El concepto se reafirma en la Cumbre de la Tierra de Río de Janeiro (1992) y en las posteriores Conferencias Internacionales que abordan este desafío.

Sostenible significa que las naciones son capaces de lograr un desarrollo económico y social sin degradar el ambiente a niveles irreversibles y protegiendo los derechos y oportunidades de las generaciones venideras (**Dalal-Clayton y Bass, 2002**). Según **Leff (2010)**, la sostenibilidad es el límite que reorienta el proceso civilizatorio de la humanidad. Es a partir de la sostenibilidad ecológica que se debe reconstruir el sistema económico, reconociendo la función que cumple la naturaleza como soporte y potencial del proceso productivo. Según **Bermejo et al. (2010)**, la definición de desarrollo sostenible que proporciona el Informe Brundtland no apoya un crecimiento ilimitado, sino el crecimiento necesario para alcanzar la satisfacción de las necesidades humanas esenciales, y considera imprescindible mejorar la organización social y garantizar una distribución más equitativa. Lo que debe hacerse sostenible es el proceso de mejora de la calidad de vida (desarrollo humano).

La magnitud del desafío llama a la participación activa de gobiernos, organizaciones y personas, pertenecientes a diferentes sectores de actividad y a diferentes campos del conocimiento, para abordar simultáneamente la protección del medioambiente, el desarrollo económico y la igualdad social, para constituir lo que se ha denominado como 'Revolución de la sostenibilidad' (**Edwards, 2005**). Poner en práctica un desarrollo sostenible supone considerar una triple dimensión: social, económica y ambiental. La dimensión ambiental comprende la gestión de los recursos del planeta, la dimensión económica, el control y distribución de los beneficios y la dimensión social, el bienestar de los seres vivos. Es el modelo llamado “triple bottom line” o TBL que, en el mundo de los negocios, proporciona una interpretación de desarrollo sostenible con la que pretende diferenciarse de los enfoques basados exclusivamente en los resultados económicos (**Maxwell et al., 2006**). En todo caso, es necesario tener en cuenta que se pueden producir múltiples matices e interpretaciones, ya que los conceptos que se manejan se prestan al debate. Para proporcionar una visión global de las tendencias que se establecen en torno al desarrollo sostenible, **Hopwood (2005)** elabora un mapa (Figura 1.3) que contiene a las más importantes.

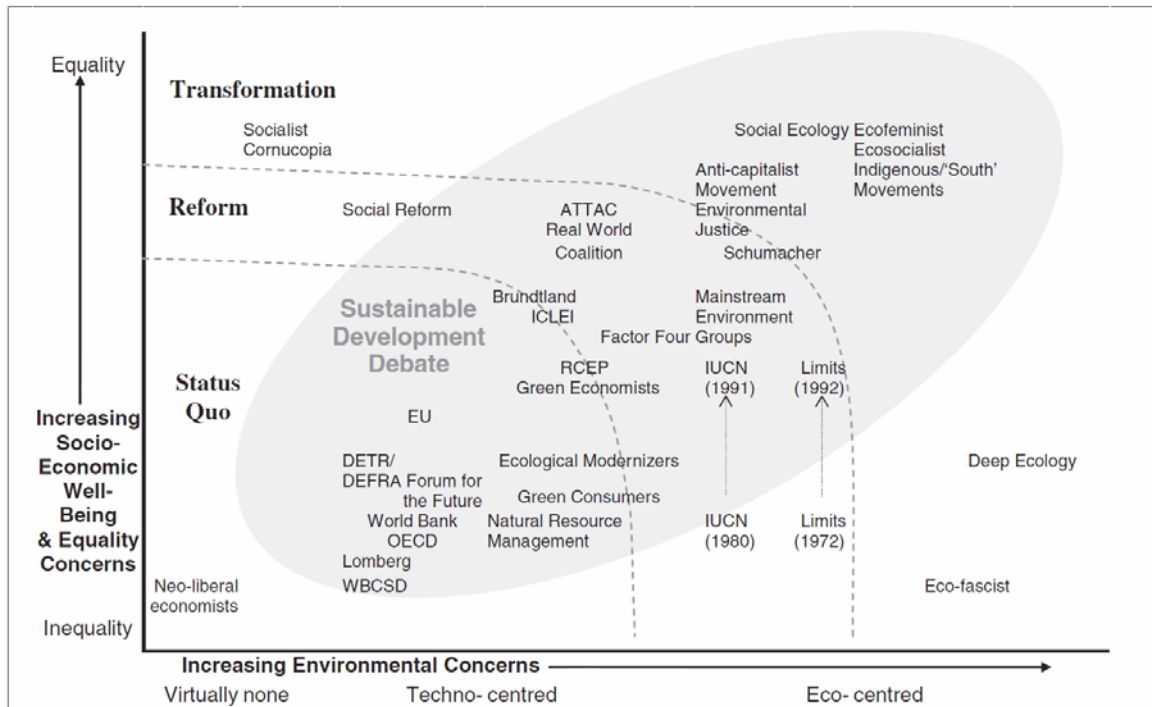
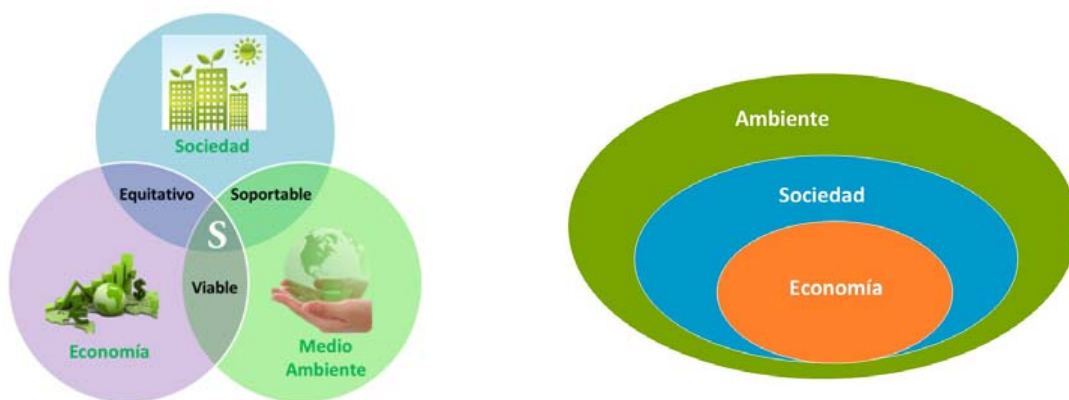


Figura 1.3. Interpretaciones sobre el desarrollo sostenible (Hopwood, 2005).

Los diferentes puntos de vista son organizados de acuerdo a la prioridad que se le atribuye al medioambiente (eje horizontal) y al nivel de importancia que se le concede al bienestar humano (eje vertical). La zona central del mapa combinaría ambas cuestiones y estaría dentro del debate del desarrollo sostenible. De acuerdo con la naturaleza de los cambios necesarios en las estructuras políticas y económicas y las relaciones entre el hombre y el medio ambiente, para lograr el desarrollo sostenible se podrían identificar tres puntos de vista: i) dentro de las estructuras existentes (status quo); ii) con una reforma fundamental (reform); iii) a través de una transformación radical (transformation). En el debate intervienen temas relacionados con el agotamiento de los recursos naturales, la pobreza, el desarrollo industrial, el crecimiento de la población, las desigualdades geográficas y entre generaciones.

Si bien los desacuerdos en los términos y las incertidumbres derivadas del desconocimiento de los efectos a largo plazo es difícil que desaparezcan, plantear un modelo de desarrollo sostenible nos lleva a cuestionar nuestro actual modelo económico que, principalmente, se basa en un crecimiento constante. Teniendo en cuenta los tres pilares en los que se sustenta (medioambiente, economía y sociedad), **Hilty and Aebischer, (2014)** hacen referencia a dos posibles visiones del desarrollo sostenible. Se puede describir como un equilibrio entre dimensiones, independientes pero conectadas, sugiriendo que existen en el mismo nivel ontológico y contienen zonas que se superponen (Figura 1.4a). No obstante, es difícil imaginar actividades económicas fuera de la sociedad, así como pensar que el capital humano puede sustituir a todos los recursos naturales. Por ello, el desarrollo sostenible también se describe a través de un conjunto de sistemas anidados (Figura 1.4b).



a) Visión de entidades en equilibrio

b) Visión de entidades anidadadas

Figura 1.4. Diferentes visiones de la sostenibilidad.

Sachs (2015) indica que la sostenibilidad es el desafío de nuestro tiempo. Tratar de lograr la armonía simultánea entre los subsistemas ecológico, económico y social es un reto complejo y multidimensional. No obstante, una estrategia holística puede ayudar a alcanzar la combinación de una prosperidad económica, una inclusión social y una protección medioambiental. Frente a este desafío, en septiembre de 2015, en el marco de la 70 edición de la Asamblea General de Naciones Unidas, todos los países adoptaron la Agenda 2030, un documento marco con 17 objetivos de desarrollo sostenible (ODS) y una agenda global de desarrollo para el periodo 2015-2030 (**A/69/L.85_2015**).

1.3. Política europea de desarrollo sostenible

En 1973, tras la celebración de la Conferencia de Estocolmo (1972), la Unión Europea inicia la elaboración de los Programas de Acción Ambiental (EAP). En el 1^{er} EAP (1973-1976), los esfuerzos se centran en establecer los principios generales de la política medioambiental comunitaria y sus objetivos se centran principalmente en reducir la contaminación atmosférica y los vertidos a las aguas a través de medidas de corrección.

En el 2º EAP (1977-1981) se incluye el control sobre la contaminación acústica, la necesidad de tomar medidas de carácter preventivo y de establecer procedimientos adecuados para realizar estudios de impacto ambiental. De 1982 a 1986 se desarrolla el 3^{er} EAP, donde se hace énfasis en la política de prevención para preservar el ambiente en el origen. Un factor transcendente de este programa es proponer que las políticas ambientales no sean aisladas. Además, en 1985 se publica la directiva que exige la evaluación de las repercusiones de determinados proyectos públicos y privados sobre el medioambiente (**Directiva 85/337/CEE**). Se pretende, de esta forma, evaluar a priori los efectos de un proyecto y determinar su posible impacto ambiental.

En el periodo 1987-1992 y en el marco del 4º EAP, se proponen medidas específicas para asegurar el alcance de las metas en los países miembros, señalando entre otras: un elevado nivel de protección, fomento de la educación ambiental, establecimiento de normas de calidad ambiental más estrictas y acceso general a la información sobre asuntos ambientales. Los periodos de vigencia de los Programas se amplían y el 5º EAP se extiende de 1992 a 2000, En 1995 se hace una revisión de metas y objetivos, lo cual lleva a una profunda reflexión sobre la eficacia de las políticas aplicadas hasta el momento. Se proponen nuevas relaciones de entendimiento, cooperación y diálogo que rompan con la tradicional incomprensión e incumplimiento de las empresas con respecto a la normativa ambiental. Desde la Unión Europea se completa la lista de proyectos que deben someterse a una evaluación ambiental sistemática (**Directiva 97/11/CE**) y se agrega el concepto 'quien contamina paga'.

Con el título *Medio Ambiente 2010: el futuro en nuestras manos* se publica en el Diario Oficial de la Comisión Europea, el 6º EAP, el cual subraya la importancia de implicar a los ciudadanos y las empresas mediante fórmulas innovadoras y también la necesidad de que los Estados miembros apliquen mejor la legislación. Se anuncia el aumento de la presión, dando mayor divulgación a los incumplimientos. En el 7º EAP, aprobado en 2013 y que abarca el periodo comprendido hasta 2020, el desarrollo sostenible se integra en las políticas y en la legislación de la Unión Europea. Los países de la Unión se comprometen a intensificar sus esfuerzos para proteger el capital natural, estimular la innovación y el crecimiento hipocarbónico y eficiente en el uso de los recursos, y proteger la salud y el bienestar de la población, respetando en todo momento los límites naturales de la Tierra.

Con la adhesión de España a la Unión Europea en 1986, se efectúa la transposición de las Directivas comunitarias mediante los Reales Decretos 1302/1986 y 1131/1988, así como a través de la Ley 6/2001 para adoptar los prescritos por la Directiva 97/11/CE. La Estrategia Española de Desarrollo Sostenible (**EEDS, 2007**) tiene un planteamiento acorde con la visión estratégica de la Unión Europea, fomentando un enfoque integrador de la dimensión económica, social y ambiental de la sostenibilidad con los objetivos de garantizar la prosperidad económica, asegurar la protección del medio ambiente, evitar la degradación del capital natural, fomentar una mayor cohesión social teniendo en cuenta las tendencias demográficas actuales y contribuir solidariamente al desarrollo de los países menos favorecidos en aras de la sostenibilidad global. De acuerdo con esta línea estratégica se desarrollan la Ley 26/2007, de Responsabilidad Medioambiental, la Ley 42/2007 de Patrimonio Natural y de la Biodiversidad y la Ley 45/2007 para el Desarrollo Sostenible del Medio Rural.

Entre los documentos que han completado y mejorado a los expuestos previamente se pueden destacar: la Ley 21/2013 de Evaluación Ambiental, el Real Decreto 1015/2013 por el que se modifican los anexos I, II y V de la Ley 42/2007 del Patrimonio Natural y de la Biodiversidad, la Ley 11/2014, por la que se modifica la Ley 26/2007 de Responsabilidad Medioambiental.

1.4. Ecología industrial

La Ecología Industrial tiene como objetivo entender cómo funciona y cómo se regula un sistema industrial y su interacción con la biosfera. Esta visión supera el llamado 'end-of-pipe approach' (enfoque de final de tubería), que se asocia al concepto tradicional de control de la contaminación. De acuerdo con este enfoque, el objetivo principal es reducir la cantidad de residuos que genera la actividad industrial para reducir, en consecuencia, el impacto sobre el medio ambiente. Se trata de un enfoque limitado al que se le pueden encontrar diferentes objeciones, por ej., los productos industriales útiles también se convierten en residuos con el tiempo y los sistemas utilizados para limpiar los flujos se transforman, a su vez, en residuos, ya que éstos pasan de un medio a otro.

Frente a estas consideraciones, la Ecología Industrial se plantea como un concepto interdisciplinar que intenta asimilar el funcionamiento de los ecosistemas industriales al de los naturales (**Graedel, 1995**), tratando de cerrar el ciclo de la materia y acercarse a un nivel de residuos cero. El trabajo colectivo publicado en los *Proceedings of the National Academy of Science* de los Estados Unidos (**PNAS, 1992**), la presenta como un enfoque para entender y optimizar el ciclo de la materia en los procesos industriales. Centrándose en el proceso de adaptación y unión entre la industria y el ecosistema, **Garner and Keoleian (1995)** consideran que la Ecología Industrial sienta las bases de la sostenibilidad, al impulsar la transformación del sistema industrial, desde una configuración lineal a un sistema cíclico, impulsando las interacciones entre economía, ambiente y sociedad e incrementando la eficiencia de los procesos.

Lowe and Laurence (1995), indican los siguientes principios para su desarrollo:

- Todas las operaciones industriales son sistemas naturales que tienen que funcionar como tal dentro de las constantes de su ecosistema y biosfera local.
- Las dinámicas y principios del ecosistema ofrecen una poderosa fuente de orientación en el diseño y dirección del sistema industrial.
- Lograr una alta eficiencia de la energía y de los materiales en producción, uso reciclado y servicios generará ventaja competitiva y beneficios económicos.

A esta metodología le surgen límites. Se destaca la diferente naturaleza de los sistemas naturales y los económicos, el hecho de que los sistemas humanos funcionan lejos del equilibrio y que son sistemas abiertos. **Lowenthal (1998)**, que analiza termodinámicamente los procesos, indica que cada vez que se transforma un material tiene menos entropía, por tanto, el residuo de un producto tiene menor entropía que la materia prima inicial y, únicamente con ese desecho, no se puede volver a fabricar el producto. Varias son las estrategias para conseguir que los sistemas industriales estén en equilibrio (**Capuz et al. 2002**).

- La creación de sistemas de industrias interrelacionados, formando redes socioeconómicas que se vinculan a través de relaciones de cooperación. Es decir, el diseño de sistemas industriales sostenibles conectados a la sociedad y al medio natural.

- Eficiencia energética y eficiencia de materiales, lo que requiere mejorar tanto el diseño del proceso industrial como el diseño de los productos que se desarrollan.
- La economía de servicios, modelo de actividad que en lugar de centrarse en la fabricación de productos se encarga de gestionar el servicio que dichos productos prestan.
- Gestión medioambiental de las empresas. La política de las empresas debe reflejar compromisos medioambientales precisos y la gestión de la misma debe encaminarse a coordinar y controlar actividades industriales de forma que se cumplan dichos compromisos.

Cervantes et al., (2009) enumeran los siguientes métodos y herramientas para fomentar la Ecología Industrial.

- Análisis de Ciclos de Vida para cuantificar todas las cargas ambientales de un producto o servicio a lo largo de su ciclo de vida.
- Análisis de Flujo de Materia para cuantificar las entradas y salidas de recursos (en masa) de una economía.
- Diagramas de flujo, que expresan los procesos que se desarrollan en una actividad industrial y las materias primas, energía, residuos y emisiones intercambiados.
- Ecoeficiencia, definida por **Stigson (1999)** como la dotación de bienes y servicios a un precio competitivo, que satisfaga las necesidades humanas y la calidad de vida, al tiempo que reduzca progresivamente el impacto ambiental y la intensidad de la utilización de recursos a lo largo del ciclo de vida, hasta un nivel compatible con la capacidad de carga estimada del planeta.
- Metabolismo Industrial, definido como el uso de materiales y energía que fluyen a través de los sistemas industriales para su transformación y disposición como residuo.
- Análisis Económico Ambiental, que cuantifica las cargas económicas de un producto o servicio sobre el ambiente.
- Producción más limpia, que se define como la aplicación continua de una estrategia ambiental preventiva.

1.5. Eco-diseño

El Eco-diseño o Diseño para el Medioambiente es una metodología centrada en el diseño de producto que tiene en cuenta, además de todos los requerimientos propios de la utilización de ese producto en un contexto determinado, cuál es su impacto ambiental. Esta metodología se basa en un planteamiento que estudia los aspectos ambientales y los impactos potenciales del producto a lo largo de todo su ciclo de vida, desde la obtención de materias primas hasta su tratamiento final. Trabajos como los de **Keoleian and Menerey, (1993)** y **Brezet and van Hemel, (1997)** exponen las bases del Eco-diseño y sirven de referencia a diferentes organismos públicos e internacionales comprometidos con el medioambiente para la elaboración de manuales que tienen como objetivo lograr diseños mejorados desde el punto de vista ambiental.

1.5.1. Evaluación del ciclo de vida (LCA)

Los primeros estudios basados en el ciclo de vida aparecen en 1969 y son realizados por el Midwest Research Institute de EEUU. En la década de los 90, la Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC) se encarga de desarrollar y liderar las discusiones científicas relacionadas con la evaluación del ciclo de vida y formula el primer código internacional de homogeneización. Posteriormente, la Organización Internacional para la Estandarización (ISO) apoya el desarrollo de esta metodología, establece una estructura de trabajo, define procedimientos y uniformiza terminologías (**ISO-14040, 2006a, 2006b**).

El ciclo de vida de un producto comprende 5 fases: obtención de materiales, producción, distribución, uso y tratamiento final (Figura 1.5). Realizar una evaluación del ciclo de vida o LCA consiste en evaluar los impactos asociados a cada etapa, establecer las variables significativas e identificar las oportunidades de mejora. Este enfoque, en el que se considera todo el ciclo de vida del producto, permite abordar el impacto de una forma global, mostrar cuál es el impacto relativo de cada etapa, detectar desplazamientos de impactos entre etapas y definir prioridades de actuación.

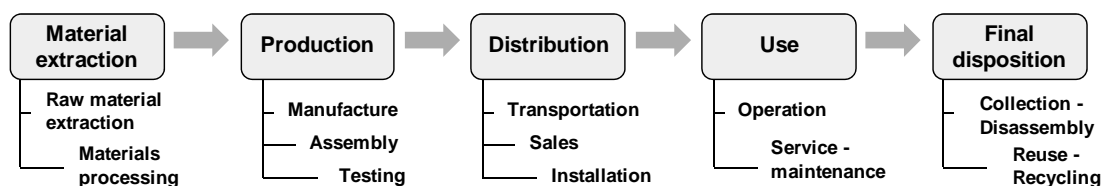


Figura 1.5. Fases del ciclo de vida de un producto (ISO 14040).

Es posible distinguir entre dos tipos de LCA: i) descriptivo, que se centra en identificar y evaluar los diferentes tipos de entradas y salidas que intervienen en un sistema bajo estudio; ii) orientado al cambio, que tiene por objetivo conocer las consecuencias medioambientales de una decisión sobre el sistema analizado (**Finnveden et al., 2009**). Un LCA completo y adaptado a una situación de diseño es un gran desafío que conlleva un proceso exhaustivo de recogida y organización de datos, la utilización de herramientas adecuadas de evaluación y una posterior interpretación de los resultados teniendo en cuenta los objetivos y alcance del estudio.

1.5.2. Herramientas de cálculo

En la elaboración de un LCA generalmente se utiliza un software que administra los datos de entrada que proporciona el usuario y obtiene, utilizando una base de datos y un método de cálculo, unos indicadores que representan el impacto ambiental del producto. La base de datos permite transformar las entradas en emisiones y el método de cálculo permite convertir las emisiones en indicadores.

Las herramientas desarrolladas para facilitar la realización de un LCA son numerosas y tienen características diversas. En la Tabla 1.1 se muestran las más utilizadas indicando, en cada caso, la base de datos en la que se apoya, la metodología de evaluación de impacto (MEI) que utiliza, algunas características específicas, el sector de aplicación y el usuario al que se dirige.

Muchas herramientas cuentan con bases de datos elaboradas por la misma compañía o institución que desarrolla el software (Boustead Model, Clean o GaBi). En algunos casos, esta base de datos se puede editar y ampliar. Otras herramientas recurren a bases externas como Ecoinvent (quizás la más difundida) o Agri-footprint (sector de agricultura y alimentación). También hay herramientas que trabajan con una metodología específica (KCL-ECO) y otras que optan por métodos múltiples (GaBi, REGIS, SimaPro). El ámbito o sector de aplicación es muy diverso: energía, construcción, producto, transporte, electrónica, embalaje,... En muchos casos, incluyen un módulo de evaluación simplificado que facilita su utilización a usuarios no expertos y permite visualizar y comparar rápidamente diferentes resultados. Para seleccionar un software conviene tener en cuenta el sector al que va dirigido, la zona geográfica en la que se apoya la base de datos, el tipo de metodología de evaluación y el alcance del estudio. Diferentes trabajos analizan y comparan las características más relevantes de este tipo de herramientas (**Menke et al., 1996; Dobón, 2009; Lehtinen et al., 2011; Boër et al., 2013**).

1.5.3. Metodologías de evaluación de impacto

El impacto ambiental se organiza en categorías y se cuantifica a través de eco-indicadores. Se consideran dos métodos de evaluación: 'midpoint', que utiliza un indicador diferente para cada una de las categorías de impacto y permite una interpretación más completa de los resultados y 'endpoint', que analiza el efecto último englobando diferentes categorías de impacto en un único indicador. Desde el punto de vista del diseñador, esta última metodología es más fácil de interpretar y de aplicar. Por otra parte, también se pueden observar diferencias en los factores de conversión utilizados para transformar emisiones en un determinado indicador (**Zabalza, 2010**).

A la hora de desarrollar una metodología de evaluación, se establecen diferentes etapas que pueden agruparse en obligatorias y optativas (**ISO 14042**):

1) Etapas obligatorias:

- Selección de las categorías de impacto, indicadores y modelos de caracterización.
- Clasificación de las emisiones obtenidas en diferentes categorías de impacto.
- Caracterización de las emisiones y transformación a indicadores.

2) Etapas optativas:

- Normalización de cada categoría de impacto calculada respecto a un valor referencia.
- Agrupación de las diferentes categorías de impacto.
- Ponderación con factores de importancia relativa a las diferentes categorías de impacto.

Si se aplican las tres etapas obligatorias se consiguen resultados 'midpoint' y si se aplican además las tres optativas, se obtienen resultados 'endpoint'.

Software	Base de datos	MEI	Características	Sector/ Usuario
BEES	United States LCI database	TRACI - Multiattribute decision analysis	Combina análisis ambiental y económico	Construcción/ Amateur
Boustead model	Propia, extensa y editable	Categorías de impacto independientes	Flexibilidad en informes de resultados	Producto/ Experto
Clean	Grupos de energía Propia y editable	Cálculo en función de uso y demanda	Combina diferentes factores y pérdidas	Energía/ Experto
CMLCA	Es incorporada por el usuario	Requiere indicadores y factores de caracterización	Libre, flexible y compatible	Varios/ Experto
E3 Database	Propia o añadida por el usuario	El proceso de cálculo es determinista	Proporciona resultados de emisiones y costes	Combustibles/ Amateur
Eco-it	No editable	Basada en ReCiPe e indicadores IPCC	Simplicidad, rápida evaluación	Producto/ Amateur
EcoPack	Boustead model y otras (BUWAL)	Se ajusta a SETAC Método Eco-Points	Indica % de reciclaje; entrada de datos limitada	Embalaje/ Amateur
eVerdEE	Propia (Italian N. Agency)	Categorías de impacto independientes	Herramienta online	Producto/ Amateur
GaBi	Integrada Módulos temáticos Otras (Ecoinvent)	Múltiples métodos: ILCD Midpoint - CML ReCiPe - IPCC - Traci	Procesos complejos asociando costes y aspectos sociales	Producto/ Experto
GEMIS	Libre - Engloba datos de 30 países	Basada en flujos de energía y materiales	Combina análisis ambiental y económico	Transporte/ Amateur
KCL- ECO	KCL Ecodata Datos de industria papelera	Dos tipos de indicadores: DAIA (Finnish Env. Institute) Eco-indicator	Flexibilidad Análisis de sensibilidad y de incertidumbre	Industria/ Amateur
EuPeco-LIMaS	Propia - Ámbito europeo	MEEuP (Energy-using Products)	Herramienta online y gratuita	Producto eléctrico-electrón. Amateur
Open LCA	Importada (ELCD, Ecoinvent, GaBi,...)	CML - EI99 - ILCD - ReCiPe - Traci	Código abierto Software libre	Varios/ Amateur
Quantis Suite	Bases múltiples: genérica-dedicada	GHG protocolo, PAS 2050, otros estándares	Interactiva - análisis ambiental y económico	Producto-Empresa Amateur
REGIS	Ecoinvent	CML - Impact 2002 - EDIP - ReCiPe - EI99	Combina análisis ambiental y económico	Compañías/ Amateur
REPAQ	USA LCI, ELCD, LCA food,...	Categorías de impacto independientes	Rápida comparación de alternativas	Embalaje/ Amateur
SimaPro	Ecoinvent - USLCI IDEMAT (materiales) Agri-footprint	Múltiples métodos: ILCD Midpoint - CML IA - EDIP - ReCiPe - EI99	Datos documentados Análisis de diferentes dimensiones	Producto-servicio/ Experto
TEAM	DEAM Starter Kit ampliable - otras	IPCC - CML USEtox model	Estructura multi-capas Análisis de sensibilidad	Producto-proceso Amateur
Umberto	Base externa: Ecoinvent - GaBi	ReCiPe Impact 2002 - EI99	Integra un amplio análisis de costes. Conexión con sistemas ERP	Producto-Proceso/ Amateur

Tabla 1.1. Herramientas de cálculo utilizadas en la realización de un LCA.

1.5.4. Categorías de impacto y Eco-indicadores

Las categorías de impacto reflejan determinados efectos ambientales. Su valoración cuantitativa se realiza a través de un indicador. En la Tabla 1.2, se muestran las categorías consideradas en varias metodologías de evaluación. **Goedkoop and Spriensma, (2000)** con el objetivo de desarrollar la metodología EI99 ('endpoint'), agrupan las categorías de impacto en tres bloques o grupos de daño: daño sobre la salud humana, daño ecológico y agotamiento de recursos. **Guinée et al., (2001)** que desarrollan la metodología CML ('midpoint'), establecen tres grupos de categorías: obligatorias, específicas del estudio y otras categorías de impacto de difícil valoración cuantitativa. Por su parte, el método BEES (**Lippiatt, 2007**) evalúa el impacto en categorías independientes.

Método EI99 (Goedkoop and Spriensma, 2000)	Método CML (Guinée et al., 2001)	Método BEES (Lippiatt, 2007)
<ul style="list-style-type: none"> Human health damage · Smog and air pollution (IR) · Health damaging substances (HD) · Carcinogens (C) <ul style="list-style-type: none"> Ecological damage · Global warming potential (GWP) · Ozone depletion (OD) · Acid rain (A) · Water eutrophication (E) · Habitat alteration or land use (LU) · Ecotoxicity (ET) <ul style="list-style-type: none"> Resource depletion · Fossil fuels (Fuels) · Fresh water (WU) · Minerals (M) · Topsoil (T) 	<p>A. Baseline impact categories:</p> <ul style="list-style-type: none"> · Depletion of abiotic resources (AD) · Impacts of land use (LU) · Climate change (GWP) · Stratospheric ozone depletion (OD) · Human toxicity (HT) · Ecotoxicity (ET): <ul style="list-style-type: none"> - Freshwater aquatic ecotoxicity (FAET) - Marine aquatic ecotoxicity (MAET) - Terrestrial ecotoxicity (TET) · Photo-oxidant formation (PO) · Acidification (A) · Eutrophication (E) <p>B. Study-specific impact categories: Land use/ Ecotoxicity/ Ionising/ Radiation/ Odour/ Noise/ Waste heat/ Casualties</p> <p>C. Other impact categories: Depletion of biotic resources/ Desiccation</p>	<ul style="list-style-type: none"> · Global warming potential (GWP) · Acidification (A) · Eutrophication (E) · Fossil fuel depletion (F) · Indoor air quality · Habitat alteration (TED) · Water intake · Criteria air pollutants (C) · Human health (H) <ul style="list-style-type: none"> · Cancerous effects · Noncancerous effects · Smog formation (S) · Ozone depletion (OD) · Ecological toxicity (ET)

Tabla 1.2. Categorías de impacto en diferentes metodologías de evaluación de impacto.

Una de las categorías de impacto incluida en todas las metodologías de evaluación es el potencial de calentamiento global o cambio climático (GWP). Tiene un área de influencia global y se refiere a la alteración de la temperatura global del planeta causada por los gases de efecto invernadero. Se mide en Kg de CO₂ equivalente y considera, además de CO₂, otros gases que generan efecto invernadero como CH₄, NO₂ y HFCs. Otras categorías de impacto muestran los efectos sobre el medioambiente de diferentes emisiones o la disminución de recursos naturales, abióticos y uso de la energía. Por ejemplo, la acidificación (A) considera las emisiones de óxidos de nitrógeno y azufre, la eco-toxicidad (ET) tiene en cuenta la emisión de sustancias tóxicas y el agotamiento de ozono (OD) la emisión de CFCs. Las categorías de impacto definidas tratan de cubrir los ciclos bio-geo-químicos globales del P, N, C y agua, los principales sistemas de circulación física del planeta y las características que contribuyen a su capacidad autorregulatoria.

El área de influencia geográfica de las categorías de impacto puede variar desde un alcance muy localizado hasta un ámbito de influencia global. **Stranddorf (2005)** revisa estas áreas de influencia (Tabla 1.3). Las variables que operan a escala global y de cambio lento son más complejas de cuantificar. Mientras, en ecosistemas de escala local y regional (bosques, lagos,...), hay evidencias de que cambios graduales en ciertas variables generan un cambio sistémico.

Impact categories	Geographic scale			
	Global	Regional	Local	Work env.
Global warming potential	X			
Stratospheric ozone depletion	X			
Photochemical oxidant formation		X	X	
Acidification		X	X	
Nutrient enrichment		X	X	
Effects of waste heat water		X		
Ecotoxicity	X	X		
Human toxicity		X	X	
Working environment				X
Odour			X	
Noise			X	
Radiation				
Resource consumption	X	X	X	
Land use			X	
Waste			X	
Effects on eco-systems				

Tabla 1.3. Área de influencia de categorías de impacto (Stranddorf, 2005).

La selección de categorías de impacto y de indicadores de evaluación depende de los objetivos y del alcance del estudio que se pretende realizar. Centrándose en la actividad industrial, **Azapagic and Perdan, (2000)**, proponen una serie de indicadores para identificar el desarrollo de prácticas más sostenibles, señalando que para reflejar las características de cada actividad es necesario utilizar indicadores específicos de sector. **Rachuri et al., (2009)** señalan que para evaluar los impactos y guiar su interpretación deberían ser utilizadas diferentes métricas de proceso y **Andriankaja et al., (2015)** indican que dos tipos de indicadores deberían ser utilizados en procesos de diseño de producto: indicadores de impacto ambiental y métricas ingenieriles.

El cálculo de indicadores de acuerdo con los métodos 'midpoint' y 'endpoint' se muestra en la Figura 1.4. En primer lugar se obtienen los diferentes tipos de emisiones correspondientes a los datos de inventario del sistema objeto de estudio ('LCI result'). Cada una de estas emisiones se asocia a una categoría de impacto ('midpoint category'). A continuación, se realiza la evaluación de categorías a través de indicadores 'midpoint'. Las categorías se agrupan en diferentes grupos de daño ('endpoint categories') y se establecen una serie de grupos de daño principales. De cada uno de estos grupos se obtiene un indicador representativo. El impacto global se expresa a través de un único indicador que engloba a todos los demás. La utilización de los dos métodos no es excluyente. Dependiendo de los objetivos del estudio se puede optar por un método particular o realizar ambos.

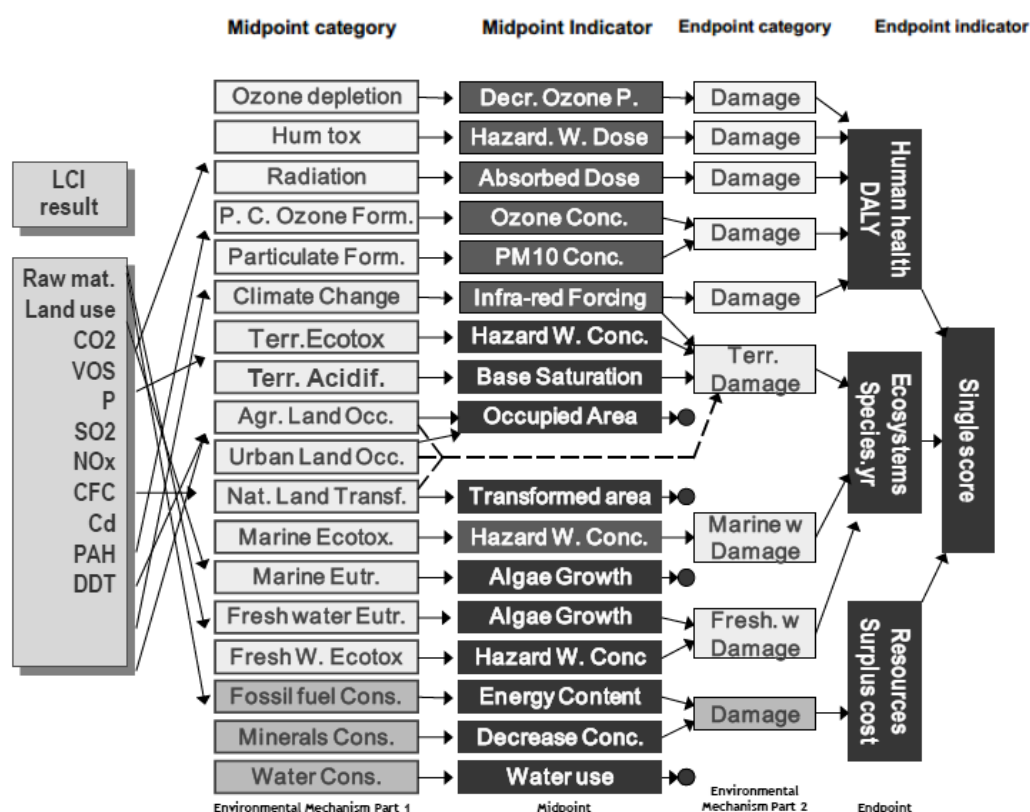


Figura 1.6. Cálculo de indicadores 'midpoint' y 'endpoint' (Goedkoop et al., 2013).

1.5.5. Estudios de Eco-diseño

Un amplio número de trabajos se han desarrollado poniendo en práctica el enfoque basado en el ciclo de vida y utilizando las herramientas y métodos de evaluación de impacto ambiental expuestos previamente. En la Tabla 1.4 se recogen algunos de los trabajos revisados en la literatura, indicando en cada caso los siguientes aspectos: tipo de producto, objetivos y alcance del trabajo, métodos y herramientas aplicadas y principales resultados obtenidos. Los estudios muestran la amplia variedad de productos analizados y de alternativas planteadas.

En cada caso de estudio se indican los objetivos principales y como indican **Lacasa et al. (2016)**, se pueden diferenciar tres tipos de objetivos:

- (A) Evaluación del impacto ambiental. Comparación de diferentes etapas del ciclo de vida.
- (B) Evaluación y comparación del impacto de diferentes alternativas.
- (C) Evaluación del impacto e identificación/aplicación de mejoras en el diseño.

En muchos casos los estudios de eco-diseño plantean la evaluación del impacto ambiental de un producto con diferentes variantes o alternativas de composición, de desarrollo o de aplicación. Aplican metodologías de evaluación de tipo 'midpoint' lo que permite hacer una interpretación más completa de los efectos ambientales. Por el contrario, no son muchos los estudios que además proyectan mejoras y son capaces de evaluar y compararlas con el producto inicial.

Autores	Producto	Objetivo	Etapas analizadas	Metodología	Resultados
Corbierre-Nicollier et al., (2001)	Pallet de material plástico	(B) - Dos tipos de composición - Tres escenarios de final de vida	Todo el ciclo de vida	CML (midpoint) E95 (endpoint)	La biofibra tiene menor impacto que la fibra de vidrio. Además se reduce el uso de PP y el uso de combustible.
Hospidio et al., (2002)	Leche de vaca	(B) - Dos granjas lecheras (C) - Tres opciones de mejora	Obtención de m. primas, producción y envasado	CML (midpoint)	Se logran mejoras al añadir un reactor anaeróbico, una instalación de trat. de gas y cambiar la ración de comida
Reginald and Hsien, (2005)	Materiales de embalaje EPS y CPB	(B) - Cantidad de material utilizado - Cinco escenarios de final de vida	Todo el ciclo de vida	EI99 (endpoint)	Utilizar menos material es favorable. El peor escenario de fin de vida es el vertedero
Masruroh et al., (2006)	Sistema termo-solar	(A) - Tres etapas (B) - Cuatro sist. de calentamiento	Obtención de m. primas, producción y distribución	Midpoint impact categories	La etapa de distribución es muy poco significativa. El sistema desarrollado mejora la eficiencia
Foolmaun and Ramjeawon, (2008)	Botellas de PET	(A) - Todas las etapas (B) - Comparación de tres escenarios	Todo el ciclo de vida	EI99 (endpoint)	Producción y uso son las etapas de mayor impacto. La incineración es la opción de tratamiento preferida
Martinez et al., (2009)	Turbina eólica	(A) - Estudio de 4 componentes: góndola, torre, rotor, cimentación	Todo el ciclo de vida	CML (midpoint) y EI99 (endpoint)	La cimentación es la parte de todo el conjunto turbina que tiene mayor impacto medioambiental
Hetherington et al., (2011)	Aceites de colza y girasol	(A) - Análisis de etapas y diferentes métodos de asignación	Cultivo, extracción, refinado y transporte	EI99 (endpoint)	La contribución relativa de cada etapa cambia con la metodología de asignación aplicada
Song et al., (2012)	Monitores de TV CRT	(A) - Todas las etapas (B) - Tres escenarios de final de vida	Todo el ciclo de vida	CML (midpoint) y EI99 (endpoint)	La etapa de uso presenta el mayor impacto ambiental. Se recomienda el tratamiento específico de residuos
Bortolini et al., (2014)	Maquinaria de recogida de forraje	(B) - Estudio de dos máquinas	Todo el ciclo de vida	EI99 (endpoint)	La máquina con menor impacto y menor coste es la que realiza, a la vez, acopio y empaquetado del forraje
Elduque et al., (2014)	Placa electrónica de cocina de inducción	(B) - Dos placas electrónicas de control de potencia	Todo el ciclo de vida	CML (midpoint)	El mayor impacto es generado en la etapa de uso y por inductores de núcleo anular
Fargnoli et al., (2014)	Cortacésped	(C) - Estudio de dos mejoras en el sistema de alimentación del motor	Todo el ciclo de vida	EI99 (endpoint). QFED	Mejora ambiental y económica en la etapa de uso y mantenimiento del producto
Babaizadeh et al., (2015)	Sistemas de sombra (ventanas exteriores)	(B) - Cinco climas - Tres materiales diferentes de generación de sombra	Todo el ciclo de vida	BEES (midpoint impact categories)	Se obtiene una guía sobre el diseño de sistemas de sombra en diferentes instalaciones
Del Pero et al., (2015)	Metro de Roma	(A) - Estudio de la sensibilidad del vehículo a la ocupación	Todo el ciclo de vida	CML (midpoint)	Elevado impacto en la etapa de uso debido al consumo de energía en operaciones de tracción
Iritani et al., (2015)	Armario realizado en tablero MDF	(A) - Tres etapas (B) - Tres sistemas de producción	Obtención de m. primas, fabricación y distribución	EDIP-97 (midpoint impact categories)	Alto impacto en la etapa de obtención de materias primas. Se recomienda el uso de madera residual
Chobtang et al., (2017)	Leche de vaca - aliment. con pastos	(B) - Dos niveles de intensificación (53 granjas en estudio)	Obtención de m. primas, transporte y producción	Midpoint impact categories	Alta intensificación produce mayor producción de leche y mayor impacto ambiental.
Siddiqui et al. (2017)	Energía eléctrica	(B) - Tres tipos de generación: hidroeléctrica, eólica y nuclear	Todo el ciclo de vida	CML (midpoint)	La producción de energía hidroeléctrica tiene el menor impacto. El sistema eólico el mayor impacto global
O'Born (2018)	Puente (1,65 Km)	(B) - Dos tipos de materiales: madera y hormigón	Todo el ciclo de vida	CML (midpoint)	El proyecto de puente construido en madera tiene menor impacto global
Horowitz et al., (2018)	Bottled water	(A) - Todas las etapas (B) - Cuatro tipos de materiales	Todo el ciclo de vida	Midpoint impact categories	Producción y distribución son las etapas de mayor impacto. Se recomiendan materiales biodegradables

Tabla 1.4. Estudios de impacto medioambiental en desarrollo de producto.

1.5.6. Eco-innovación

La mayoría de las definiciones de innovación enfatizan ‘novedad’ y ‘éxito’. Innovación es un concepto amplio que puede ser definido como “la aplicación comercial o industrial de algo nuevo: un producto, proceso o método de producción nuevo; un nuevo mercado o fuente de suministro; una nueva forma de organización comercial o financiera” (**Crul and Diehl, 2007**). Según **Lamvik (2001)**, un primer sentido del término puede estar referido al proceso de innovación y a la manera en la cual la innovación es alcanzada, y un segundo sentido al resultado de la innovación, donde el énfasis se pone en el nuevo producto, proceso o servicio.

La innovación de productos se refiere a la introducción de productos nuevos con características y/o aplicaciones de uso que se distinguen de las de productos ya existentes en el mercado. Puede ser clasificada en tres niveles:

- 1) Innovación incremental: implica mejoras paso por paso de productos existentes. Realiza cambios pequeños en un tiempo determinado y a veces se denomina mejora continua. Tiende a fortalecer posiciones de mercado de empresas establecidas.
- 2) Innovación radical: cambia los productos o procesos existentes drásticamente. Implica el desarrollo de nuevos elementos claves de diseño dando como resultado un producto que se distingue notablemente de la línea de productos existente en la empresa.
- 3) Innovación fundamental: Depende del nuevo conocimiento científico y abre nuevas industrias, provocando un cambio de paradigma. En la fase inicial, las contribuciones de la ciencia y de la tecnología son importantes.

Los proyectos de innovación incremental siguen habitualmente un proceso estructurado y previsible. Económicamente y comercialmente, el rediseño de productos a base de pequeños cambios es tan importante como la innovación radical.

La innovación que tiene por objetivo reducir las repercusiones negativas sobre el medioambiente, bien mejorando la resistencia a las presiones medioambientales o bien mediante la consecución de un aprovechamiento más eficiente y responsable de los recursos naturales, es planteada como Eco-Innovación. De acuerdo con **Mathieux et al. (2001)**, su práctica supone una serie de beneficios en el desarrollo de productos, ya que el equipo de diseño tiene un enfoque mucho más amplio y toma decisiones pensando en todo el ciclo de vida del producto. Esto permite comprender mejor toda la compleja cadena de agentes implicados y adquirir una visión global de las oportunidades de mercado, ahorro de costes y cartera de productos. Un estudio realizado por **Van Hemel and Cramer (2002)**, en 77 pequeñas y medianas empresas, muestra que los estímulos considerados más importantes a la hora de lanzar y desarrollar proyectos de Eco-diseño son las oportunidades de innovación, el esperado incremento de la calidad del producto y las potenciales oportunidades de mercado. Además del beneficio para el medioambiente, se valora la aceptación de productos por los usuarios y las perspectivas de mercado de estos productos.

Un estudio basado en encuestas realizadas a profesionales de diferentes disciplinas en España (**Santolaria et al., 2011**) muestra que la sostenibilidad es un motor fundamental para la innovación de las empresas. Los factores que la impulsan dependen del tamaño. Así en empresas pequeñas (1-10 trabajadores) el factor más importante es la reducción de costes, seguido del marketing y el valor de marca y el menos importante las sanciones económicas. En el caso de empresas medianas (10-250 trabajadores) el factor más importante es satisfacer las demandas del cliente y el menos importante es evitar las sanciones económicas. Finalmente, en grandes empresas (más de 250 trabajadores) los factores más importantes son el cumplimiento de la legislación y evitar sanciones, mientras que el menos importante es la reducción de costes. La Unión Europea, decidida a que las empresas pongan en marcha iniciativas de Eco-innovación, lanza en 2008 el Programa de Emprendimiento e Innovación. Este programa plantea el desarrollo de productos, técnicas, servicios y procesos en cinco líneas principales: el reciclado de materiales y procesos de reciclaje, productos de construcción sostenibles, el sector de alimentos y bebidas, tratamiento y distribución de agua y negocios ecológicos.

1.6. Diseño de productos sostenibles

El Eco-diseño se centra en los aspectos técnicos ligados al impacto ambiental de los sistemas y pone una atención limitada en los aspectos humanos. Sin embargo, promover la sostenibilidad significa abordar de forma simultánea tres ámbitos de actuación: medioambiental, económico y social (**UNCED, 1992**), por tanto, teniendo en cuenta los principios socio-éticos dentro de un modelo de producción y consumo ecológico y económicamente viable.

Con el objetivo de integrar la sostenibilidad en el desarrollo de productos y servicios y de acuerdo con los métodos basados en el ciclo de vida aplicados en Eco-diseño, **Maxwell and Van der Vorst (2003)**, proponen utilizar una 'checklist' para tener en cuenta, en cada una de las etapas del ciclo de vida, los impactos ambientales y socio-económicos más habituales. **Maxwell et al., (2006)** elaboran una guía específica de desarrollo sostenible de producto (*The Guide for Developing Sustainable Products and Services in industry*) recopilando los trabajos más destacados que habían sido realizados hasta ese momento. Como primera etapa del proceso consideran una necesidad funcional y plantean la forma más sostenible de lograr esa función a través de un producto, servicio o sistema producto-servicio (PSS).

A lo largo de esta última década, varios autores profundizan en el tema del diseño para la sostenibilidad (**Kloepffer, 2007; Finkbeiner et al., 2010; Valdivida et al., 2013**). El resultado de sus investigaciones es el desarrollo de un marco de trabajo, denominado LCSA (Life Cycle Sustainability Assessment), que analiza y evalúa la sostenibilidad del ciclo de vida. LCSA tiene en cuenta las interconexiones entre sistemas ecológicos y socio-económicos, evalúa impactos y proporciona directrices para alcanzar productos y servicios sostenibles.

Para ello combina tres técnicas de evaluación del ciclo de vida: E-LCA, LCC y S-LCA, que se refieren a cada una de las dimensiones que comprende la sostenibilidad. E-LCA (Environmental Life Cycle Assessment), o también LCA, se centra en los aspectos medioambientales. LCC (Life Cycle Costing) reúne y evalúa los aspectos económicos. S-LCA (Social Life Cycle Assessment) trata de evaluar el impacto sobre las diferentes organizaciones y agentes sociales. Este enfoque se basa en el desarrollo de tres ciclos de vida simultáneos (Figura 1.7) y es expresado como: $LCSA = LCA + LCC + S-LCA$.

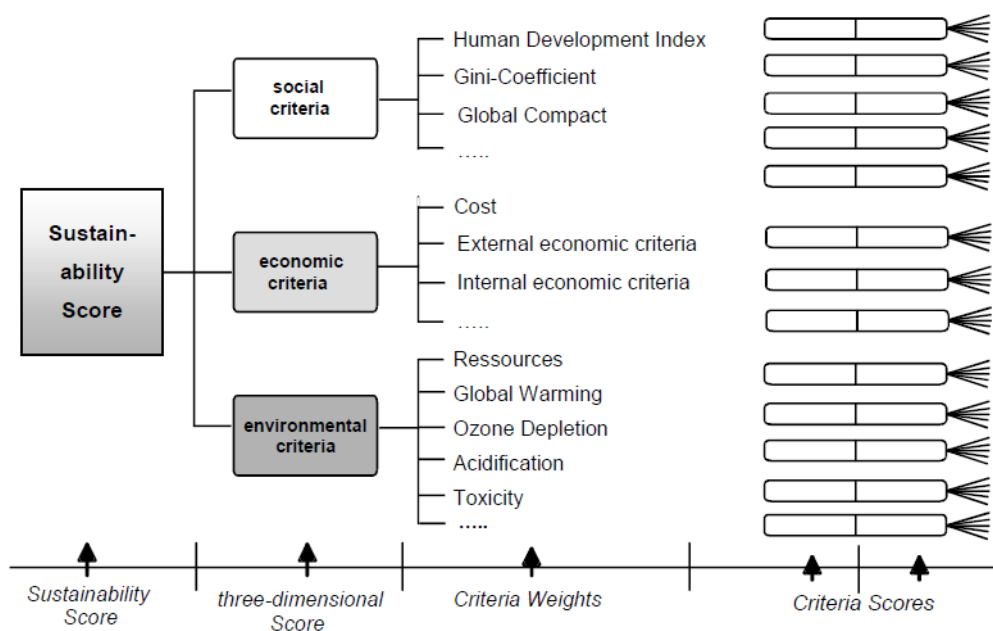


Figura 1.7. Esquema LCSA abordando las tres dimensiones de la sostenibilidad (Finkbeiner et al., 2010).

En la dimensión ambiental se han establecido diferentes categorías de impacto e indicadores que permiten valorar y cuantificar aspectos ambientales. En el caso de los impactos socio-económicos, éstos pueden ser divididos en cinco categorías, de acuerdo con las directrices que se establecen desde el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente en conjunción con la Sociedad de Toxicología Ambiental y Química (**UNEP/SETAC, 2009**). Se consideran las categorías de agentes sociales y subcategorías de impacto que se muestran en la Figura 1.8.

A la hora de elaborar esta clasificación, el grupo de expertos exploró dos esquemas: uno basado en los agentes sociales y otro basado en categorías de impacto. Este último consideraba grandes temas sociales: derechos humanos, condiciones de trabajo, salud y seguridad, herencia cultural, gobernanza, repercusiones socio-económicas. No obstante, se consideró que una categorización basada en agentes sociales proporcionaba una base más sólida para desarrollar un S-LCA y era más fácil de consensuar, teniendo en cuenta, además, que las dos clasificaciones se complementan. En el esquema basado en agentes sociales, inicialmente se establecieron cuatro categorías: trabajadores, comunidad local, consumidores y sociedad (nacional y global) y la categoría de actores de la cadena de valor fue añadida posteriormente para capturar el impacto de las relaciones entre productores y proveedores.

Stakeholders	Subcategories
Workers	<ul style="list-style-type: none"> ■ Freedom of association and collective bargaining ■ Child labour ■ Forced labour ■ Fair salary ■ Working time ■ Discrimination ■ Health and safety ■ Social benefits/social security
Local community	<ul style="list-style-type: none"> ■ Access to material resources ■ Access to immaterial resources ■ Delocalisation and migration ■ Cultural heritage ■ Respect of indigenous rights ■ Safe and healthy living conditions ■ Secure living conditions ■ Local employment ■ Community engagement
Society	<ul style="list-style-type: none"> ■ Public commitments to sustainable issues ■ Contribution to economic development ■ Prevention and mitigation of conflicts ■ Technology development ■ Corruption
Value chain actors	<ul style="list-style-type: none"> ■ Fair competition ■ Promoting social responsibility ■ Supplier relationships ■ Respect of intellectual property rights
Consumers	<ul style="list-style-type: none"> ■ Health and safety ■ Feedback mechanism ■ Transparency ■ End of life responsibility

Figura 1.8. Agentes sociales y subcategorías (UNEP/SETAC, 2009).

Como indican **Benoît-Norris et al. (2011)**, el desarrollo de un S-LCA puede apoyarse en una serie de documentos y estándares internacionales. En particular, los informes de sostenibilidad según las directrices del GRI (Global Reporting Initiative) y las normas de responsabilidad social (**ISO 26000**) tienen objetivos estrechamente relacionados con las subcategorías de impacto social y contienen información útil para su valoración.

En general, LCA y LCC usan indicadores cuantitativos, sin embargo las cuestiones sociales no son fáciles de cuantificar y a la hora de realizar un S-LCA se han de manejar numerosos indicadores semi-cuantitativos o cualitativos. **Kloepffer, (2008)** señala como aspecto crítico en la realización de un LCSA la selección de indicadores y destaca la dificultad que entraña su cuantificación (particularmente en S-LCA), por lo que se deberían desarrollar herramientas apropiadas de evaluación. Además, no recomienda la agregación de resultados (como en los métodos 'endpoint') ya que se reduce la transparencia e incrementa la incertidumbre. Igualmente, **Valdivia et al. (2013)** desaconsejan la suma y ponderación de resultados e indican que el análisis debería ser realizado de forma separada para cada técnica pero con una representación paralela de las tres técnicas.

Adelle and Pallemarts (2009), consideran tres niveles diferentes de uso de indicadores: i) el de los objetivos globales; ii) el de los objetivos operativos; iii) el de las acciones concretas. Basándose en las directrices de UNEP/SETAC, **Ciroth and Franze (2011)** clasifican los procesos de estudio en principales y secundarios y proponen en cada caso la utilización de una serie de indicadores para evaluar el impacto social de un producto a lo largo de su ciclo de vida. **Ren et al., (2015)** distinguen dos tipos de indicadores de evaluación de la sostenibilidad: simples y múltiples. Los indicadores múltiples utilizan criterios multidimensionales. En todo caso, resaltan que lograr unos resultados claros y completos es un desafío que requiere mantener un equilibrio adecuado entre las dimensiones analizadas.

También hay trabajos que tratan de desarrollar indicadores simplificados puesto que consideran que facilitan la comunicación de resultados. Para comparar la sostenibilidad de diferentes productos, **Traverso et al., (2012)** implementan una herramienta denominada Life Cycle Sustainability Dashboard (LCSD) y utilizan el índice de comportamiento sostenible que obtienen mediante un promedio ponderado de diferentes indicadores. Por su parte, **Bernier et al., (2013)** proponen un método que combina resultados de LCA y LCC y proporciona una evaluación del impacto a través de un único indicador.

Varios estudios plantean la aplicación de LCSA para evaluar la sostenibilidad en diferentes procesos productivos. Entre estudios se pueden citar los realizados por **Capitano et al., (2011)** que analizan la producción de mármol en dos tipos de plantas industriales; **Chang et al., (2015)** que comparan la sostenibilidad de diferentes procesos de soldadura; o el desarrollado por **Eaatswood and Haapala (2015)** que examinan la sostenibilidad en la fabricación de engranajes cónicos. En todo caso, la aplicación práctica de un LCSA es todavía muy limitada. Las empresas y las organizaciones siguen centrando su atención en los aspectos medioambientales y el alcance de sus actuaciones va destinado principalmente a la evaluación de este tipo de impactos. Es necesario fortalecer la idea de una evaluación sinérgica y desarrollar soluciones que traten de reducir la incertidumbre que caracteriza a la sostenibilidad. Al analizar la evolución del concepto sostenibilidad de producto, **Dyllick and Rost (2017)**, perciben un desarrollo hacia un modelo en el que el producto tiene una contribución específica a la resolución de problemas sociales. El concepto evoluciona desde el valor privado al valor público, desde productos que benefician a clientes o consumidores a productos que benefician a la sociedad.

Glosario de acrónimos

BEES	Building for Environmental and Economic Sustainability
BUWAL	Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft
Clean	Comprehensive Least Emissions Analysis
CML	Center of Environmental Science of Leiden University
CMLCA	Chain Management by Life Cycle Assessment
COP	United Nations Climate Change Conference
EAP	Environmental Action Plan
Eco-it	Ecological – Indicator Tool
Ecoinvent	Life Cycle Inventory Database
EcoPack	Ecological - Package
EDIP	Environmental Design of Industrial Product
EEDS	Estrategia Española de Desarrollo Sostenible
EI99	Eco-indicator 99
E-LCA	Environmental Life Cycle Assessment
ELCD	European Life Cycle Database
EPA	United States Environmental Protection Agency
EuPeco-LIMaS	Life Cycle Innovation and Management for SMEs (EuP and EEE)
eVerDEE	Webbased Screening Life Cycle Assessment Tool for European SMEs
GaBi	Ganzheitliche Bilanzierung
GEMIS	Global Emission Model for Integrated Systems
GHG	Greenhouse Gases
GRI	Global Reporting Initiative
GWP	Global Warming Potential
IDEMAT	Identification Materials
ILCD	International Reference Life Cycle Data System
Impact 2002	Impact Assessment of Chemical Toxics Version 2002
IPCC	Group Intergovernmental Panel on Climate Change
ISO	International Organization for Standardization
KCL-ECO	Keskuslaboratorio – Centrallaboratorium Ab – Ecology
LCA	Life Cycle Assessment
LCC	Life Cycle Cost
LCI	Life Cycle Inventory
LCSA	Life Cycle Sustainability Assessment
LCSD	Life Cycle Sustainability Dashboard
MEEuP	Method for the Evaluation of Energy-using Products
MEI	Metodología de Evaluación de Impacto
ODS	Objetivos de Desarrollo Sostenible
Open LCA	Open Life Cycle Assessment
PSS	Product-Service System
ReCiPe	RIVM and Radboud University, CML and Pre Consultants
REPAQ	Resource and Environmental Profile Analysis Query
SETAC	Society of Environmental Toxicology and Chemistry

SimaPro	System for Integrated Environmental Assessment of Products
S-LCA	Social Life Cycle Assessment
TBL	Triple bottom line
TEAM	Tool for Environmental Analysis and Management
TRACI	Tool for the Reduction and Assessment for Recovery and Disposal
UNCED	United Nations Conference on Environment and Development
UNEP	United Nations Environment Programme
WCED	World Commission on Environment and Development

Capítulo 2.

Metodología de Desarrollo de Productos Sostenibles

Este capítulo hace una revisión del proceso evolutivo que han experimentado los modelos de desarrollo de producto y los métodos y herramientas que han sido utilizados desde la ingeniería de diseño para integrar la sostenibilidad. En cada caso, se muestran las etapas en las que se descompone cada modelo y las actividades que intervienen en su realización.

Se expone la metodología de Eco-diseño que integra la dimensión medioambiental de la sostenibilidad en el proyecto de desarrollo de producto apoyándose en tres tipos de técnicas: de análisis y evaluación ambiental, de mejora ambiental y de integración de requerimientos. Además, se muestra la evolución reciente hacia métodos que incorporan en el proceso de diseño aspectos económicos y sociales, por tanto, que contemplan las tres dimensiones de la sostenibilidad.

En el último apartado de este capítulo se presenta la metodología planteada para integrar la sostenibilidad en los proyectos de desarrollo de producto, incluyendo el análisis y evaluación de cada una de sus dimensiones y un proceso de rediseño que contempla las especificaciones del producto y propone estrategias de mejora de la sostenibilidad a partir del análisis de métricas e indicadores adecuados.

2.1. Modelos de diseño y desarrollo de producto

La metodología de diseño tiene su origen en los años 1950 y se desarrolla en la década siguiente, principalmente dentro de los medios académicos inglés y norteamericano. En 1962 se celebra en Londres *The Conference on Design Methods*, que supone el lanzamiento de la metodología de diseño como asignatura o ámbito de estudio y aparece la figura del diseñador como agente con la misión de transformar una situación existente en una situación deseada (**Simon, 1982**).

Desde su aparición, el diseño de producto ha estado ligado al entorno industrial y en un entorno cada vez más controlado por la ley de la oferta y la demanda, el diseño se ha convertido en una herramienta indispensable para conseguir productos con una buena posición de mercado. La actividad de diseño de producto analiza requisitos y especificaciones y, a través de una serie de tareas y actividades ordenadas en un orden lógico, estudia las diferentes variables que intervienen en el problema para tratar de alcanzar una solución idónea (**Munari, 1983; Cross, 1984**). A lo largo de estas décadas, los métodos y herramientas de diseño y desarrollo de producto han evolucionado generando los modelos que se exponen a continuación.

1) Modelo de desarrollo de producto integrado

Este modelo (**Andreasen and Hein, 1987**), separa el proceso de desarrollo de producto en seis fases. Comienza con la identificación de una necesidad y finaliza con la ejecución del producto (Figura 2.1). Entre estas etapas es necesario investigar la necesidad, definir los principios de diseño, diseñar el producto y preparar la producción. Se consideran tres líneas de trabajo simultáneas que contemplan, respectivamente, el mercado, el producto y el sistema de producción. Cada línea depende del resto para alcanzar un resultado satisfactorio. Se observa que este modelo no tiene en cuenta la vida del producto más allá de su fase de ejecución.

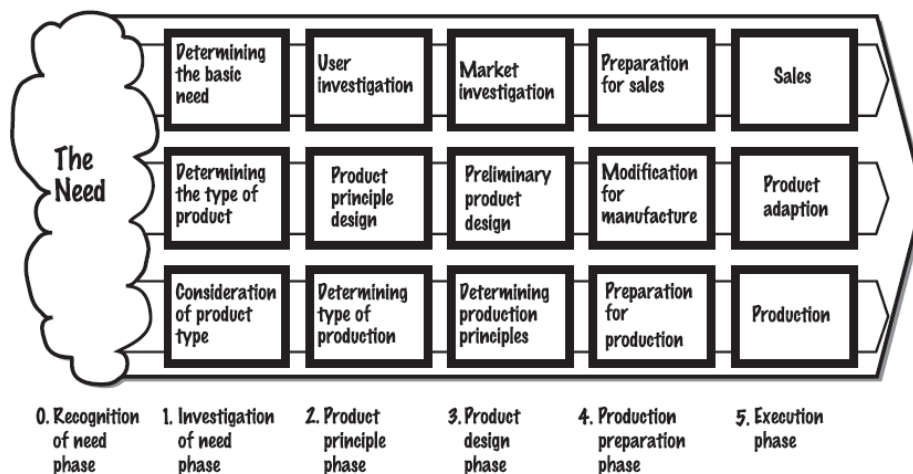


Figura 2.1. Modelo de desarrollo de producto integrado (Andreasen and Hein, 1987).

2) Modelo sistemático de diseño en la ingeniería

Es un modelo centrado en el proceso de resolución de un problema de diseño, lo que para algunos autores es una variante de la resolución de un problema general. Según **Pahl and Beitz (1996)**, cuando se diseña un producto el diseñador desarrolla una serie de actividades esenciales: identificación de una necesidad, formulación del problema y de las especificaciones de diseño, propuesta de alternativas, evaluación y selección de una solución y, finalmente, comunicación de los resultados. Estos autores proponen un modelo prescriptivo que se basa en la descomposición funcional, la morfología y la síntesis creativa, para generar una idea de producto y desarrollarla. Tal y como muestra la Figura 2.2, se consideran cuatro fases: planificación, diseño de concepto, diseño esencial y diseño en detalle.

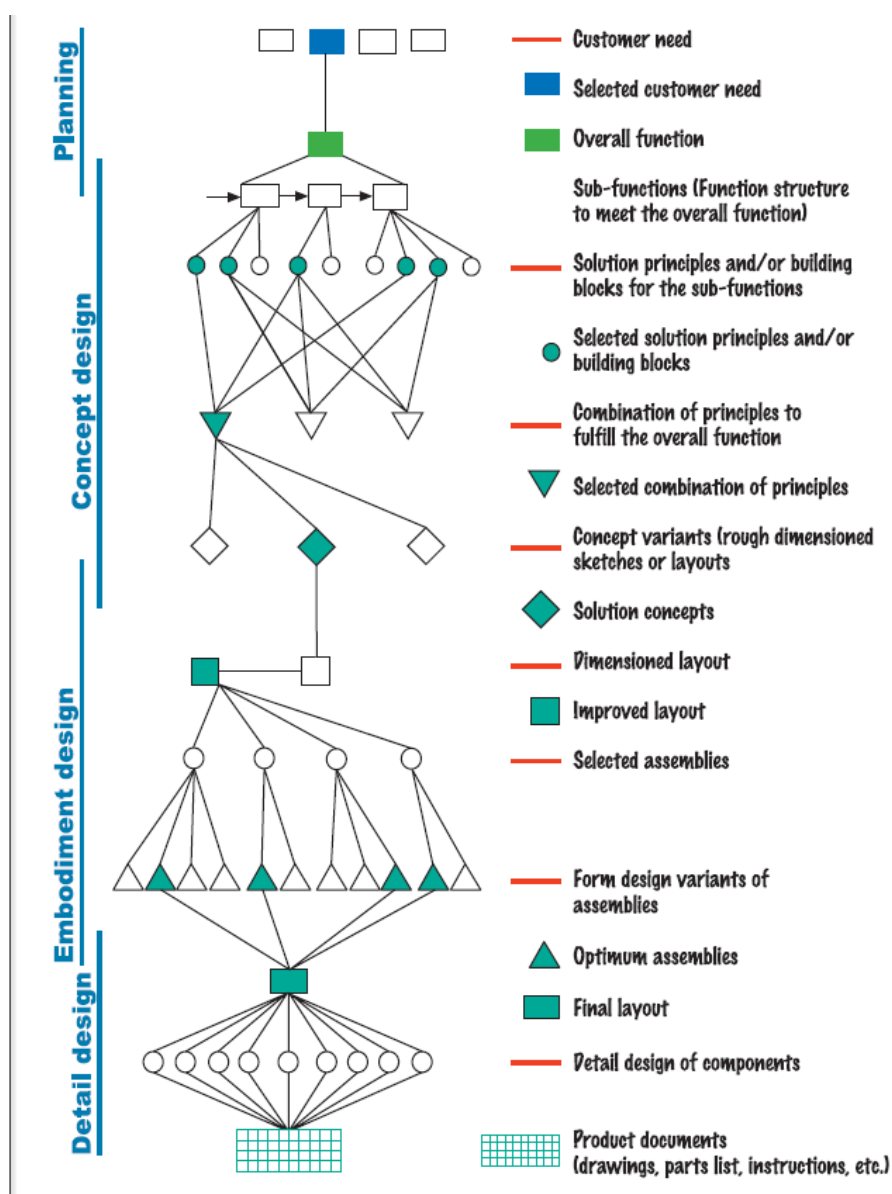


Figura 2.2. Modelo sistemático de diseño en la ingeniería (Pahl and Beitz, 1996).

La actividad de diseño comienza con una fase estratégica donde se recopila toda la información necesaria para definir los requisitos y especificaciones que ha de cumplir el producto. A continuación, en la fase de análisis se identifica el núcleo del problema de diseño. El siguiente paso es descomponer el problema en sub-problemas y plantear alternativas que permitan dar solución a estos sub-problemas. Este proceso de generación de conceptos se realiza con la ayuda de diferentes técnicas, métodos y herramientas. En la fase siguiente, se da forma y estructura al producto de acuerdo con la descripción de los conceptos seleccionados. Por último, en la fase de diseño de detalle, se desarrolla toda la documentación necesaria para realizar su producción. Cada fase conlleva tomar una serie de decisiones que afectan a la siguiente fase. Las iteraciones dentro de cada fase y entre fases constituyen el ciclo básico de diseño referido por **Roozenburg and Eekels, 1995**.

3) Ingeniería inversa y rediseño

Según se muestra en la Figura 2.3, **Otto and Wood (1999)** proponen una metodología de rediseño formada por tres etapas: i) ingeniería inversa; ii) modelado y análisis; iii) rediseño.

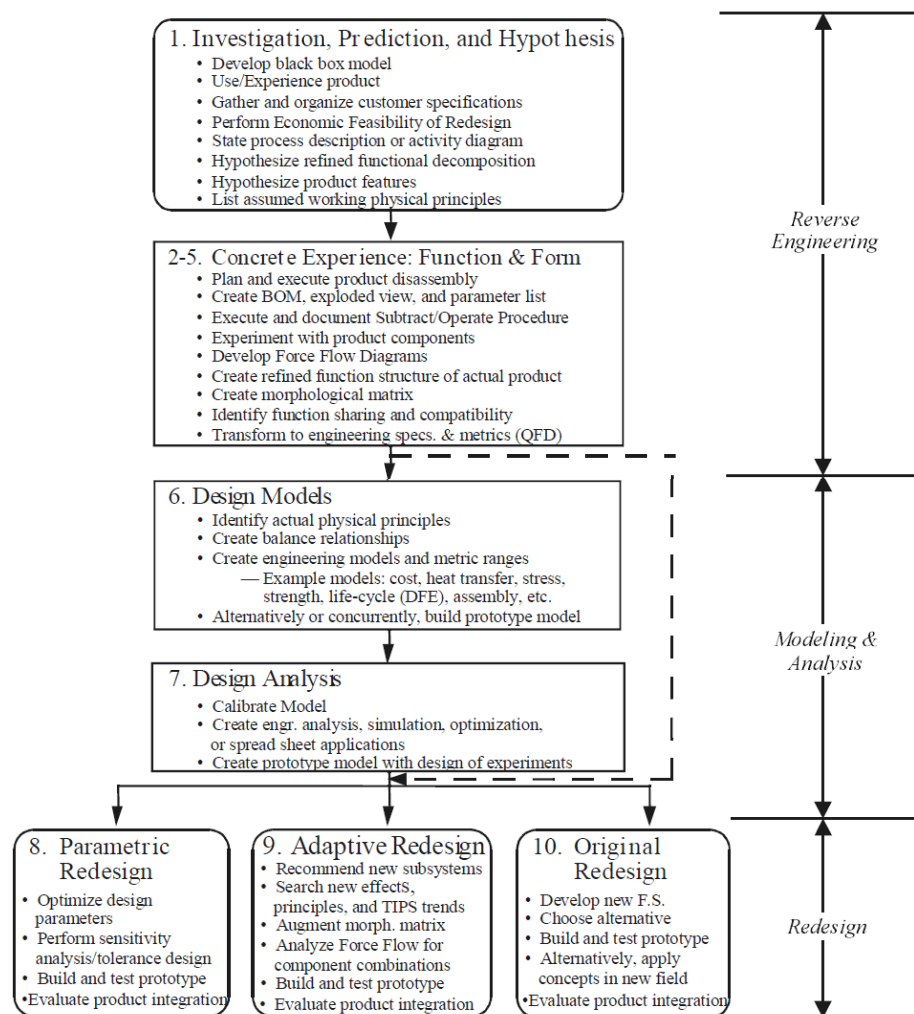


Figura 2.3. Ingeniería inversa y metodología de rediseño (Otto and Wood, 1999).

Estos autores indican que los modelos previos pueden ser aplicados a determinado tipo de problemas de diseño que se centran en buscar soluciones originales o formulaciones paramétricas bien planteadas. Sin embargo, para un proceso de rediseño es necesario tener un pleno conocimiento de la situación actual de un producto. La ingeniería inversa aborda el proceso de rediseño teniendo como punto de partida una experiencia de desarrollo de producto. En la primera etapa se analiza y documenta con todo detalle el producto. La segunda etapa supone el análisis de estrategias y la ejecución y experimentación de modelos. En la última etapa se rediseña el producto y de esta forma, se produce su evolución. Este se hace de acuerdo a tres opciones: la optimización de parámetros, la adaptación de su configuración o de sus componentes o el desarrollo de ideas originales.

4) Ingeniería concurrente y diseño para X (DfX)

La ingeniería concurrente consiste en incorporar al comienzo del proyecto de diseño, factores que aparecen en fases de desarrollo del producto más avanzadas como la fabricación, el montaje o el mantenimiento, en el comienzo del proyecto de diseño (**Capuz et al., 1999; Yassine et al., 1999**). En función del factor considerado se proponen diferentes estrategias o aplicaciones de diseño denominadas DfX o Diseño para X (Figura 2.4). El modelo contempla el ciclo de vida del producto y fomenta la cooperación y el trabajo en equipo entre diferentes áreas y departamentos de la empresa implicados en su desarrollo. **Kuo et al. (2001)**, hacen una revisión de factores y estrategias considerados habitualmente en el Diseño para X, entre los que se encuentran: fabricación (DfM), montaje/desmontaje (DfA), reciclabilidad (DfRec), calidad (DfQ), mantenimiento (DfMt), fiabilidad (DfR) o medioambiente (DfE).

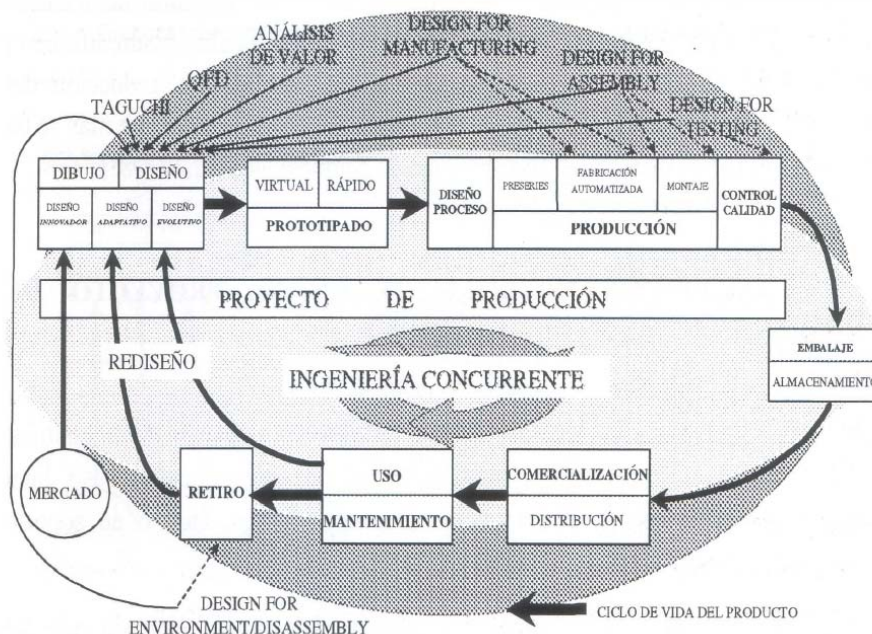


Figura 2.4. Ingeniería concurrente y Diseño para X (Capuz et al., 1999).

A través del DfX se pretende obtener una cuantificación útil de un factor de diseño que forma parte del ciclo de vida del producto, con el objetivo de considerarlo en los procesos de toma de decisión que se llevan a cabo en las primeras fases. En su aplicación se llevan a cabo los siguientes pasos:

- Análisis del producto y organización de toda la información relacionada.
- Selección de indicadores para medir las interacciones entre producto y proceso.
- Evaluación de indicadores.
- Comparación de medidas de rendimiento frente a los estándares del proceso.
- Diagnóstico para la mejora y búsqueda de las causas que originan debilidad.
- Exploración de alternativas de mejora en las áreas problemáticas.
- Identificación de puntos críticos y propuesta de soluciones.

5) Modelo genérico de desarrollo de producto

Ulrich and Eppinger (2000) plantean un modelo de desarrollo de producto formado por fases secuenciales que comienzan con la planificación de actividades y terminan con la producción y lanzamiento del producto (Figura 2.5).

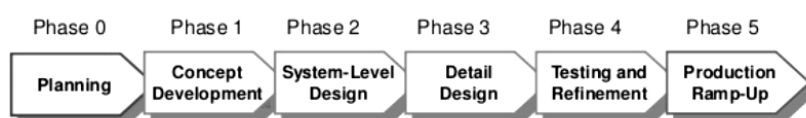


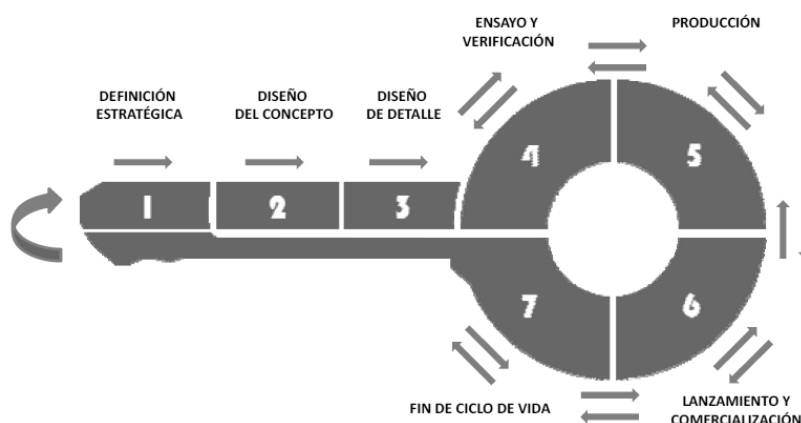
Figura 2.5. Fases del proceso de desarrollo de producto (Ulrich and Eppinger, 2000).

La fase de planificación incluye, entre otros aspectos, una evaluación de la tecnología y la definición de los objetivos de mercado con el fin de establecer una estrategia de desarrollo de producto. En la fase de generación de concepto se proponen diferentes ideas de producto, algunas de las cuales serán seleccionadas para su posterior desarrollo y ensayo. En la siguiente fase se define el producto, el conjunto, sus partes y componentes, con el objetivo de obtener un diagrama preliminar del flujo de proceso. A continuación, se definen completamente todas las partes y elementos del producto y se establece el plan de fabricación dentro del sistema global de producción. En la fase de ensayo y refinamiento se construyen los primeros prototipos y se comprueba si el producto satisface las especificaciones iniciales. Finalmente, se realiza su producción en serie y la distribución del producto a los puntos de venta.

Teniendo en cuenta un enfoque de ciclo de vida, este modelo de desarrollo de producto puede ampliarse y completarse con las etapas de uso y disposición final. Se obtiene de esta forma, un esquema de desarrollo de producto formado por siete fases, que comienza con la definición estratégica y concluye con el tratamiento final del producto (Figura 2.6). En casos como el diseño de productos de una misma familia o el rediseño de producto, la última fase se puede enlazar con la primera de acuerdo al planteamiento "llave del diseño" propuesto por **Rosal (2011)**.



Fases en un proyecto de diseño (INTI, 2009)



La llave del diseño (Rosal, 2011)

Figura 2.6. Fases del modelo genérico de desarrollo de producto.

Cada una de las fases que intervienen en el desarrollo de producto lleva asociados unos objetivos, se caracteriza por la realización de una serie de tareas y actividades y pretende alcanzar unos resultados (**INTI, 2009**). Y también en cada una de estas fases, diferentes técnicas y herramientas facilitan la realización de las tareas involucradas y la consecución de los objetivos planteados. En trabajos como los de **Ramírez (2012)** y **Milton and Rodgers (2013)** se hace una amplia revisión de las herramientas más utilizadas en cada fase.

Debido a su capacidad para relacionar y estructurar la información (**Deubzer and Lindermann, 2008**), las matrices forman parte de muchas de las herramientas utilizadas en el proceso de diseño, que asisten al diseñador en tareas como definir los requerimientos mínimos de un producto, identificar oportunidades de mejora y preferencias de usuario o también evaluar y seleccionar diferentes alternativas o conceptos de producto. **Santolaya et al (2017)**, revisan las fortalezas y debilidades de varias de estas técnicas utilizadas en las primeras fases del proceso de desarrollo de producto y proponen la utilización de la herramienta SFCM ("specifications-factors-concepts matrix"), para abordar el estudio de un problema de diseño integrando los principales contenidos de los que depende. Como se describe en el siguiente apartado, las herramientas tipo matriz adquieren también un papel muy relevante en los métodos de desarrollo sostenible de producto, ampliándose en algunos casos, transformándose en otros casos, con el objetivo de incluir los conceptos asociados a la sostenibilidad.

2.2. Desarrollo sostenible de producto. Métodos y herramientas

La sostenibilidad ha sido integrada de manera gradual en el proceso de desarrollo de producto. Desde hace unas décadas se está realizando la integración de la dimensión ambiental a través del Eco-diseño y de manera reciente se comienzan a utilizar métodos que incorporan también la dimensión socio-económica de la sostenibilidad.

2.2.1. Aplicación de criterios medioambientales

La metodología de Eco-diseño se basa en la aplicación conjunta de criterios medioambientales y criterios convencionales en el proyecto de desarrollo de un nuevo producto. Dos publicaciones, resultado de los trabajos de investigación de la Universidad de Delft (Holanda) exponen esta metodología: el manual *PROMISE* (acrónimo de Desarrollo de productos con el medio ambiente como estrategia de innovación) y *Ecodesign: a promising approach to sustainable production and consumption* (**Brezet and van Hemel, 1997**). Para integrar el medioambiente en la metodología de desarrollo de producto tradicional se han de realizar tres tareas esenciales: investigar información medioambiental, evaluar el impacto ambiental y plantear estrategias de mejora. **Brezet and van Hemel (1997)** estructuran un proyecto de eco-diseño en siete fases y en cada una de ellas se realizan diversas actividades, tal y como se detalla en la Tabla 2.1.

Etapas	Actividades
1. Organización del proyecto de eco-diseño	1.1. Conseguir la aprobación de Dirección 1.2. Establecer un equipo de proyecto 1.3. Trazar planes y preparar un presupuesto
2. Selección del producto	2.1. Establecer los criterios de selección 2.2. Decidir el producto de referencia 2.3. Definir el informe de diseño
3. Establecimiento de la estrategia de eco-diseño	3.1. Analizar el perfil medioambiental del producto 3.2. Analizar los puntos a favor internos y externos 3.3. Generar opciones de mejora 3.4. Estudiar su viabilidad 3.5. Definir la estrategia de eco-diseño
4. Generación y selección de ideas	4.1. Generar ideas de producto 4.2. Organizar un taller en eco-diseño 4.3. Seleccionar las ideas más prometedoras
5. Detalle del concepto	5.1. Desarrollar las estrategias de eco-diseño 5.2. Estudiar la viabilidad de los conceptos 5.3. Seleccionar el más prometedor
6. Comunicación y lanzamiento del producto	6.1. Promover internamente el nuevo diseño 6.2. Desarrollar un plan de promoción 6.3. Preparar la producción
7. Establecimiento de actividades de seguimiento	7.1. Evaluar el producto resultante 7.2. Evaluar los resultados del proyecto 7.3. Desarrollar un programa de eco-diseño

Tabla 2.1. Fases de un proyecto de Eco-diseño (Brezet and van Hemel, 1997).

De manera casi simultánea (**Wenzel et al., 1997**) desarrollan en la Technical University of Denmark la metodología EDIP (Environmental Design of Industrial Products). Se estructura en cuatro etapas: concreción, especificación, síntesis y verificación, y se caracteriza por tener dos figuras, un especialista en análisis ambiental y un diseñador, que se distribuyen las actividades relacionadas con el desarrollo de producto (Tabla 2.2). Esta estructura es la que propone también la Sociedad de Toxicología y Química Medioambiental (SETAC).

Etapas	Especialista	Diseñador
Concreción	LCA de un producto de referencia	
	<ul style="list-style-type: none"> Identificar los potenciales impactos y sus principales causas Simular cambios en el producto y elaborar LCA Desarrollar LCA de alternativas, incluyendo productos de la competencia 	<ul style="list-style-type: none"> Identificar un producto de referencia identificar alternativas existentes. Aportar soluciones de diseño
Especificación	Establecer objetivos ambientales	
		<ul style="list-style-type: none"> Analizar las percepciones y prioridades ambientales de los consumidores Definir la especificación ambiental del producto
Síntesis	LCA de nuevos productos	
	<ul style="list-style-type: none"> Evaluación ambiental de conceptos 	<ul style="list-style-type: none"> Adaptación medioambiental
Verificación	<ul style="list-style-type: none"> Comprobar las propiedades ambientales del producto 	<ul style="list-style-type: none"> Verificar las soluciones de diseño

Tabla 2.2. Estructura de tareas de la metodología EDIP (Wenzel et al., 1997).

Ambas metodologías se basan en un enfoque de análisis del producto que considera todo su ciclo de vida, de manera que se puedan detectar compensaciones o desplazamientos de los impactos entre diferentes fases y se pueden definir prioridades para una acción efectiva (**Fiksel et al., 1998**). El desarrollo de la metodología de Eco-diseño requiere la utilización de tres tipos principales de herramientas denominadas, respectivamente, de evaluación ambiental, de mejora ambiental y de integración de requerimientos.

A) Herramientas de análisis y evaluación ambiental

La evaluación de impactos es necesaria para proporcionar una buena comprensión inicial de los problemas medioambientales causados por el producto de referencia. A través de las herramientas de evaluación se puede observar la contribución de cada etapa del ciclo de vida en el impacto global del producto, se puede comparar el impacto ambiental de diferentes productos y se puede comparar un producto rediseñado con el inicial. Estas herramientas pueden ser de tipo cualitativo o semi-cuantitativo, más fáciles y rápidas de usar aunque no muy fiables, o de tipo cuantitativo, que aportan un detallado perfil medioambiental de un producto.

La matriz MET (Materials, Energy and Toxic emissions) es una técnica semi-cuantitativa que permite obtener una visión global de las entradas y salidas a lo largo del ciclo de vida del producto. En las dos primeras columnas de la matriz se indican las entradas de materiales y energía y en la última columna, las salidas en forma de emisiones tóxicas, vertidos o residuos (Figura 2.7). Permite localizar las etapas donde se concentran aspectos ambientales críticos e indicar la severidad de los efectos de forma cualitativa (bajo, medio, alto). Por tanto, se trata de una herramienta que permite organizar la información y detectar prioridades ambientales, pero no valora cuantitativamente el impacto ambiental. Se recomienda su utilización cuando se comienza a trabajar en Eco-diseño.






	Uso de MATERIALES (Entradas) M	Uso de ENERGÍA (Entradas) E	EMISIONES TÓXICAS (Salidas: emisiones, vertidos, residuos) T
Obtención y consumo de materiales y componentes 	- Todos los materiales, piezas y componentes necesarios que son comprados tal cual.	- Consumos de energía necesarios para la obtención en bruto de los materiales comprados. - Energía necesaria para obtener los materiales en el estado en que son adquiridos (laminados, tratamiento superficial,...) - Consumo de energía para el transporte de los materiales comprados hasta fábrica.	- Residuos tóxicos generados en la obtención y transformación de los materiales adquiridos antes de su llegada a la empresa.
Producción en fábrica 	- Materiales auxiliares comprados tal cual (tomillería, elementos eléctricos,...). - Sustancias auxiliares que son usadas en el proceso de producción y no incluidas en la etapa anterior (elementos para soldadura, pintado, moldeado de fibra de vidrio,...).	- Consumos de energía en los procesos empleados en fábrica.	- Residuos tóxicos producidos en fábrica. - Restos de materiales: recortes, rechazos,...
Distribución 	- Embalajes del producto. - Elementos de reembalaje empleados para el transporte y distribución.	- Consumos de energía en el empaquetado y embalaje (caso de ser significativos). - Transporte desde fábrica a los distribuidores finales.	- Residuos de la combustión producidos durante el transporte. - Residuos de embalaje.
Uso o utilización 	- Consumibles. - Piezas de repuesto estimadas.	- Energía consumida por el producto a lo largo de su vida útil estimada.	- Residuos de consumibles. - Residuos de piezas de repuesto.
Sistema de fin de vida Eliminación final 	- Consumo de materias primas y auxiliares para el tratamiento de fin de vida.	- Energía utilizada en alguno de los sistemas fin de vida de materiales o partes (incineración, desmontaje, reciclado,...) - Energía para el transporte a los sistemas de fin de vida.	- Residuos tóxicos que genera el producto y que son destinados a gestor autorizado. - Materiales a vertedero. - Reciclaje de materiales. - Residuos de la combustión.

Figura 2.7. Desarrollo de la matriz MET (IHOBE, 2000).

Las herramientas cuantitativas se basan en la realización de una evaluación del ciclo de vida o LCA. Es un procedimiento normalizado (**ISO-14040, 2006a, 2006b**) que se compone de cuatro fases entre las que se produce un intercambio de información (Figura 2.8):

1. Definición de objetivos y alcance.

En esta fase se exponen los motivos para su realización, se describen los métodos de recopilación de datos y las técnicas de presentación de resultados. Se indica cuáles van a ser los límites de evaluación (de acuerdo a la aplicación final, hipótesis planteadas y limitaciones consideradas) y cuál va a ser la unidad funcional de referencia utilizada en el análisis.

2. Análisis de inventario.

Se identifican y cuantifican las entradas y salidas de cada uno de los procesos relacionados con el producto objeto de estudio e incluidos dentro de los límites del sistema. El objetivo del inventario es hacer un balance de los flujos intercambiados en cada etapa del ciclo de vida para la unidad funcional seleccionada. Los flujos elementales de entrada son energía y materia prima y los de salida emisiones, subproductos y residuos.

3. Evaluación del impacto.

A partir de los datos inventariados se realiza el cálculo de impacto ambiental. Para ello se utilizan bases de datos y software específico que, en la mayoría de los casos, también facilita la presentación de resultados. Se han desarrollado diferentes aplicaciones (Tabla 1.1) que trabajan con diferentes bases de datos y métodos de cálculo.

4. Interpretación.

En esta fase se analizan los resultados, se establecen las conclusiones y se proponen una serie de recomendaciones. Se identifican las variables significativas y se determinan los procesos que aportan mayor impacto, de manera que se puedan tomar decisiones útiles.

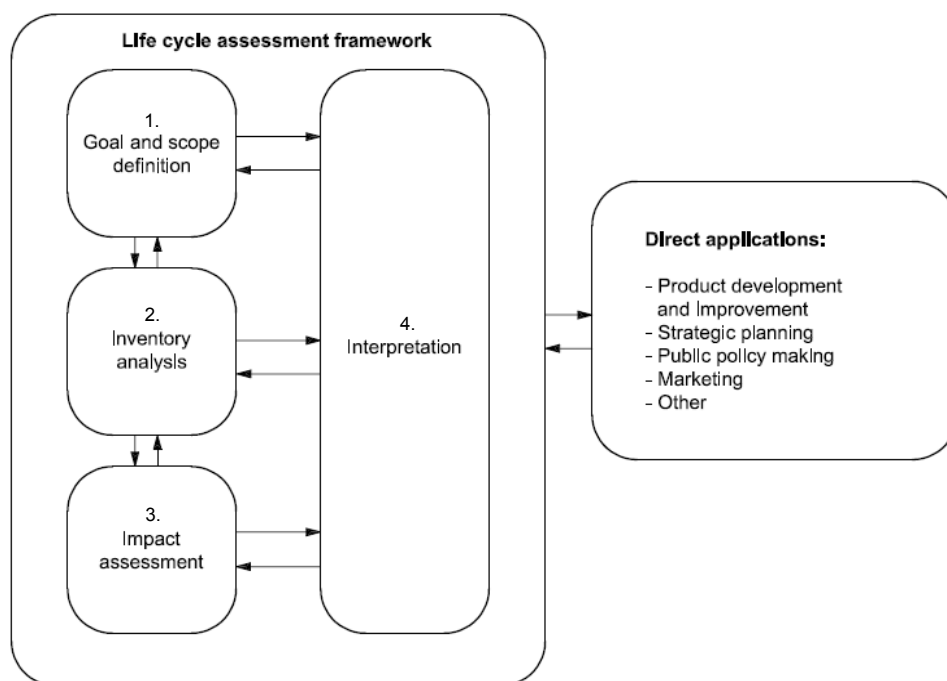


Figura 2.8. Etapas de desarrollo de un LCA (ISO-14040, 2006a).

Andriankaja et al., (2015) clasifican las herramientas de evaluación ambiental en cuatro grupos o familias (Tabla 2.3) y además indican algunas de las herramientas con mayor difusión. El grado de profundidad y de cuantificación en la evaluación de impactos ambientales se va reduciendo progresivamente desde la primera familia (LCA completo) hasta la última (listas de verificación). Las otras dos familias están formadas por herramientas basadas en LCA y herramientas basadas en matriz. Las herramientas basadas en LCA se caracterizan por incorporar un módulo de evaluación simplificado, que facilita la presentación de resultados, la comparación de diferentes versiones de producto y, a los no expertos, su utilización. Suelen proceder de herramientas modificadas de la primera familia. Las herramientas basadas en matriz y las listas de verificación permiten realizar un análisis semi-cuantitativo o cualitativo del producto e identificar los aspectos que tienen mayor incidencia sobre el medioambiente.

Familia	Descripción	Herramientas relevantes
LCA completo	Soluciones de software basadas en la evaluación del ciclo de vida	GaBi (PE International); SimaPro (Pré consultants)
Herramientas basadas en LCA	Aplicaciones que simplifican el desarrollo de un LCA y la presentación de los resultados	MECO (Wenzel and Hauschild, 2001); MIPS (Ritthoff et al., 2002); IMPULSIO (Quantis, 2009); EcoSky (Ilg, 2013)
Herramientas basadas en matriz	Identifican los aspectos ambientales más relevantes en cada etapa del ciclo de vida del producto	ESQCV (Qualitative and simplified life cycle analysis); MET (Brezet and Van Hemel, 1997)
Listas de verificación	Listado de preguntas relacionadas con las características funcionales de un producto	Ecoconcept spider web (Tischner et al., 2000); EOD, Environmental Objectives Deployment (Karlsson, 1997)

Tabla 2.3. Herramientas de evaluación ambiental utilizadas en eco-diseño (Andriankaja et al., 2015).

B) Herramientas de mejora ambiental

Las estrategias de mejora ambiental son planes generales de actuación que tienen como objetivo desarrollar soluciones para reducir el impacto ambiental de un producto. Las herramientas que permiten desarrollar estas estrategias consisten básicamente en una serie de principios y reglas que identifican acciones potenciales de mejora. **Brezet y Van Hemel (1997)**, crean la denominada rueda de estrategias de diseño para el ciclo de vida (Life Cycle Design Strategies wheel), o rueda de LiDS (Figura 2.9). En ella se distinguen 8 estrategias principales y 33 principios de eco-diseño a aplicar a lo largo de las diferentes etapas del ciclo de vida del producto. Estas estrategias son: selección de materiales de bajo impacto, reducción de materiales, optimización de las técnicas de producción, selección de sistemas de comercialización eficientes, reducción del impacto durante el uso del producto, optimización del tiempo de vida inicial, optimización del sistema de fin de vida y desarrollo de nuevos conceptos.

Esta herramienta permite también comparar el perfil ambiental de un producto existente con el obtenido tras haberle aplicado alguna de las estrategias de mejora. Esto se realiza calificando en una escala del 0 (centro de la rueda) al 6 (radio más exterior) el grado de mejora con cada una de las 8 estrategias.

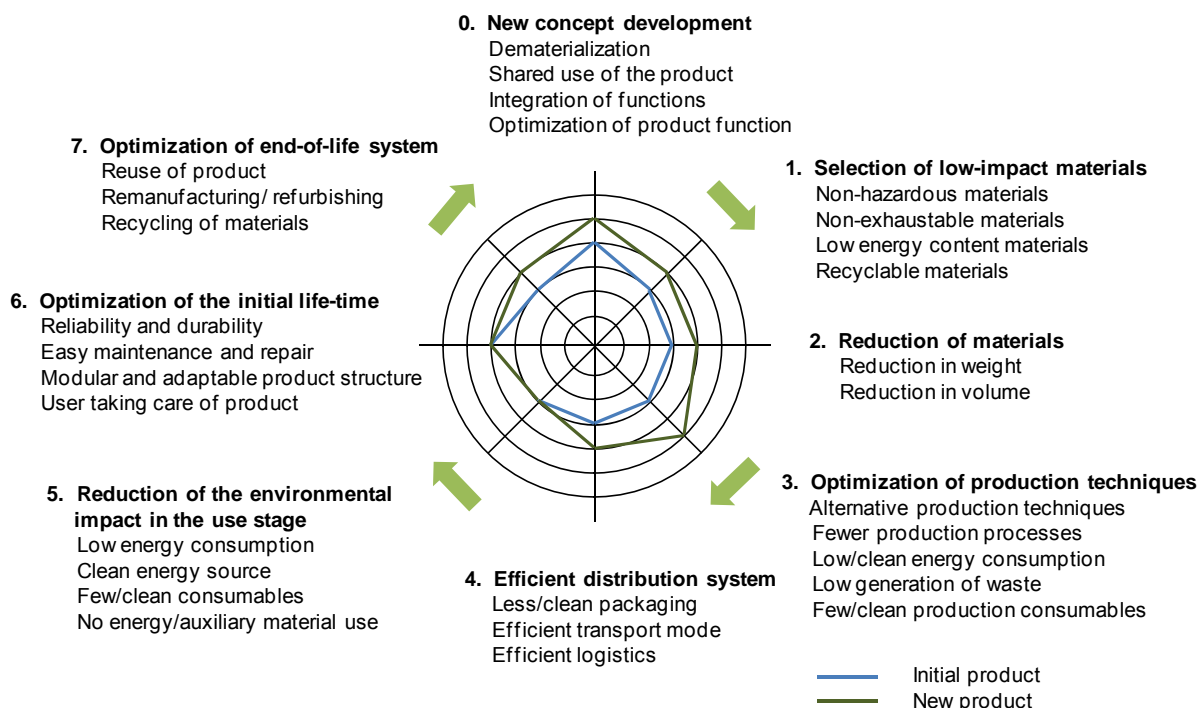


Figura 2.9. Rueda de LiDS (Brezet and van Hemel, 1997).

Con el fin de disponer de una herramienta sencilla de apoyo a la enseñanza del eco-diseño, **Luttropp and Lagerstedt, (2006)** desarrollan *The Ten Golden Rules*. Estas diez reglas pueden resumirse de la siguiente forma:

- 1) No usar sustancias tóxicas o en su caso, aplicar ciclos cerrados de uso.
- 2) Optimizar los procesos de producción y transporte.
- 3) Reducir el peso, siempre y cuando no interfiera con otros requerimientos del producto.
- 4) Minimizar el consumo de energía y recursos en la etapa de uso.
- 5) Promover la reparación y actualización.
- 6) Alargar la vida del producto.
- 7) Proteger los productos frente a la suciedad, el desgaste y la corrosión.
- 8) Informar sobre los procesos de tratamiento y disposición después del uso.
- 9) Favorecer la reparación y el reciclado.
- 10) Simplificar el montaje/desmontaje y utilizar elementos de unión apropiados.

Los autores indican que algunas estrategias de mejora pueden entrar en conflicto y el efecto favorable logrado en un determinado aspecto, tener su contrapunto en otro aspecto. Estas reglas son expresadas de forma gráfica (Figura 2.10) considerando tres etapas principales en la vida del producto: la de uso, la de antes del uso y la de después del uso.

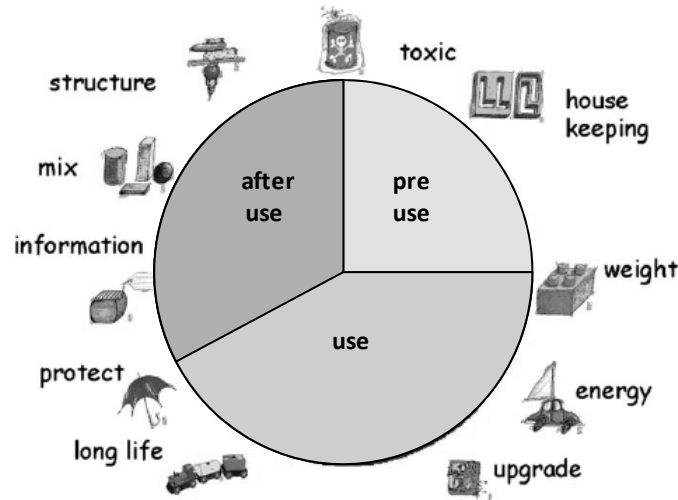


Figura 2.10. 'The Ten Golden Rules' (Luttropp and Lagerstedt, 2006).

Telenko et al., (2008) proponen la aplicación de 6 principios que agrupan 67 recomendaciones, con un nivel adecuado de abstracción y de adaptación para su utilización por los diseñadores. Por otra parte, **Crul and Diehl (2009)** desarrollan la guía de diseño para la sostenibilidad (D4S), en la que para facilitar la selección de una estrategia de mejora, clasifican los productos en cuatro categorías: activo (consume energía durante su uso), móvil (consume energía en desplazamientos), producto que requiere materiales consumibles en su funcionamiento y finalmente, producto de vida corta. **Andriankaja et al., (2015)** consideran cuatro grupos o familias de herramientas de mejora ambiental: directrices, reglas de eco-diseño, herramientas paramétricas y herramientas de toma de decisión (Tabla 2.4). En los dos primeros grupos se incluyen herramientas que plantean esencialmente principios de eco-diseño, en el tercer grupo las herramientas relacionan características del producto e impactos y en el tercer grupo se incluyen herramientas derivadas de otras convencionales utilizadas en procesos de diseño.

Familia	Descripción	Herramientas relevantes
Directrices	Recopilan, clasifican y priorizan reglas generales de eco-diseño	The Ten Golden Rules (Luttropp and Lagerstedt, 2006)
Reglas de Eco-diseño	Agrupan principios de eco-diseño y reglas básicas para mejorar un proyecto de diseño de producto	LiDs wheel, (Brezet and Van Hemel, 1997) Ecodesign Pilot (Wimmer and Züst, 2003) Information/inspiration (Lofthouse, 2006)
Herramientas paramétricas	Correlaciones matemáticas entre parámetros del producto e impactos asociados	Eco-PaS (Eco-efficiency Parametric Screening), (Dewulf, 2003)
Herramientas para la decisión	Herramientas convencionales de ayuda a la toma de decisiones aplicadas a la mejora ambiental	QFDE (Sakao, 2007); EcoTRIZ (Jones and Harrison, 2000)

Tabla 2.4. Herramientas de mejora ambiental utilizadas en eco-diseño (Andriankaja et al., 2015).

C) Herramientas que integran requerimientos

En un eco-producto desarrollado aplicando eco-diseño, la evaluación y cumplimiento de las especificaciones propias del producto no debe descuidarse. La integración de aspectos medioambientales en las primeras etapas del proceso de diseño junto con un enfoque multi-criterio que haga posible equilibrar los requerimientos de tipo ambiental con otros requerimientos tradicionales del producto son dos factores clave para el éxito (**Bovea and Pérez-Belis, 2012**). Con este objetivo, diferentes herramientas han sido desarrolladas como G-QFD (Green Quality Function Deployment) o la Matriz Eco-funcional.

La técnica QFD o Despliegue de la Función de Calidad (**Akao, 1990**), es utilizada para mejorar la calidad de los productos. Considera los requerimientos de los usuarios y los traslada a requerimientos técnicos a lo largo de cada etapa del proceso de desarrollo de producto. Mediante un método gráfico, denominado casa de la calidad, se expresan relaciones entre expectativas y necesidades de los usuarios (atributos) y características técnicas a desplegar en el proceso productivo. **Kuo (2003)** combina QFD y diseño para el ciclo de vida del producto para desarrollar la herramienta G-QFD. A través de ella despliega la voz de los clientes (VOC) y las traslada a características de ingeniería de producción, uso o disposición final del producto, para lograr un equilibrio entre varios objetivos: satisfacción del usuario, protección medioambiental y competitividad en el mercado (Figura 2.11).

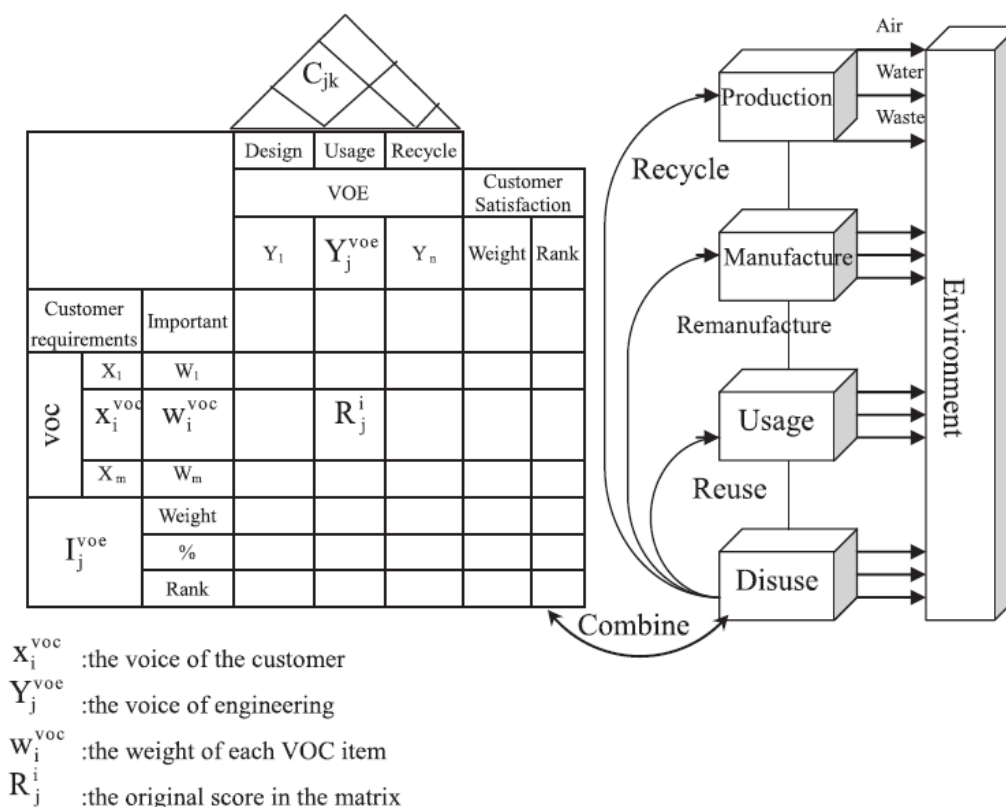


Figura 2.11. Técnica G-QFD (Kuo, 2003).

Lagerstedt et al., (2003) sugieren la creación de la matriz eco-funcional como herramienta para que el diseñador puede visualizar las relaciones entre criterios funcionales y criterios medioambientales (Figura 2.12). En esta matriz se pueden identificar tres zonas diferentes: la zona (1) que, hasta cierto punto, corresponde a un QFD convencional, la zona (2) que revela las correlaciones entre atributos funcionales y medioambientales y la zona (3) que presenta similitudes con la matriz del diseño de ciclo de vida propuesta por **Schlüter (2001)**. La aplicación de esta herramienta requiere que los mecanismos de acoplamientos sean investigados con mayor profundidad.

Type of Product: Functional Description:		Value	A)	B)	C)	D)	E)	F)	G)	H)	I)	J)	K)	L)	M)	N)	O)	P)	Q)	R)
Functional Profile	A) Lifetime																			
	B) Use-time																			
	C) Reliability																			
	D) Safety																			
	E) Human/machine																			
	F) Economy																			
	G) Technical flexibility																			
	H) Environmental demand																			
Environmental Profile	I) No. of products/year																			
	J) Size																			
	K) No. of different materials																			
	L) Material mix																			
	M) Scarce material																			
	N) Toxic material																			
	O) Energy																			
	P) Energy sources																			

Figura 2.12. Matriz Eco-funcional (Lagerstedt et al., 2003).

Bovea and Pérez-Belis (2012), obtienen una taxonomía de herramientas para evaluar e integrar requerimientos en el proceso de diseño. Tienen en cuenta el enfoque de ciclo de vida y consideran simultáneamente los requerimientos tradicionales y los relacionados con el impacto ambiental. Su trabajo queda resumido en la Figura 2.13. Por una parte, hacen una revisión de técnicas de evaluación ambiental que agrupan en cualitativas, semi-cualitativas y cuantitativas, y por otra parte, enumeran un conjunto de técnicas utilizadas para identificar e integrar especificaciones de producto: Matriz de diseño, QFD, VA (Value Analysis), FMEA (Failure Mode and Effect Analysis), metodología TRIZ, modelo de Kano y WtP (Willingness to Pay). La combinación de estos dos tipos de técnicas, da lugar a una serie de herramientas que permiten la integración de requerimientos ambientales en el proceso de diseño de producto. Son también clasificadas en varios grupos en función de la técnica utilizada como referencia para realizar la integración.

Los dos primeros grupos consideran la influencia de las expectativas y requerimientos de los clientes en cuestiones ambientales mediante la aplicación de matrices de diseño o la técnica de despliegue de la función de calidad. El siguiente grupo está basado en la técnica de análisis del valor (**EN 12973, 2002**), herramienta utilizada habitualmente para valorar la aceptación del producto por el cliente, de manera que su aplicación integraría también el valor ambiental. La técnica FMEA (**Stamatis, H., 1995**) es utilizada para identificar, evaluar y prevenir deficiencias relacionadas con la seguridad del producto. Las herramientas basadas en esta técnica tratan las cuestiones ambientales en lugar de un fallo potencial de componentes. Otras herramientas se basan en la metodología TRIZ (**Altshuller and Shulyak, 1998**), que aplica los principios de creatividad a la obtención de innovaciones técnicas, o en el modelo de Kano (**Kano, 2001**), que permite identificar preferencias de los usuarios y oportunidades para la mejora de producto.

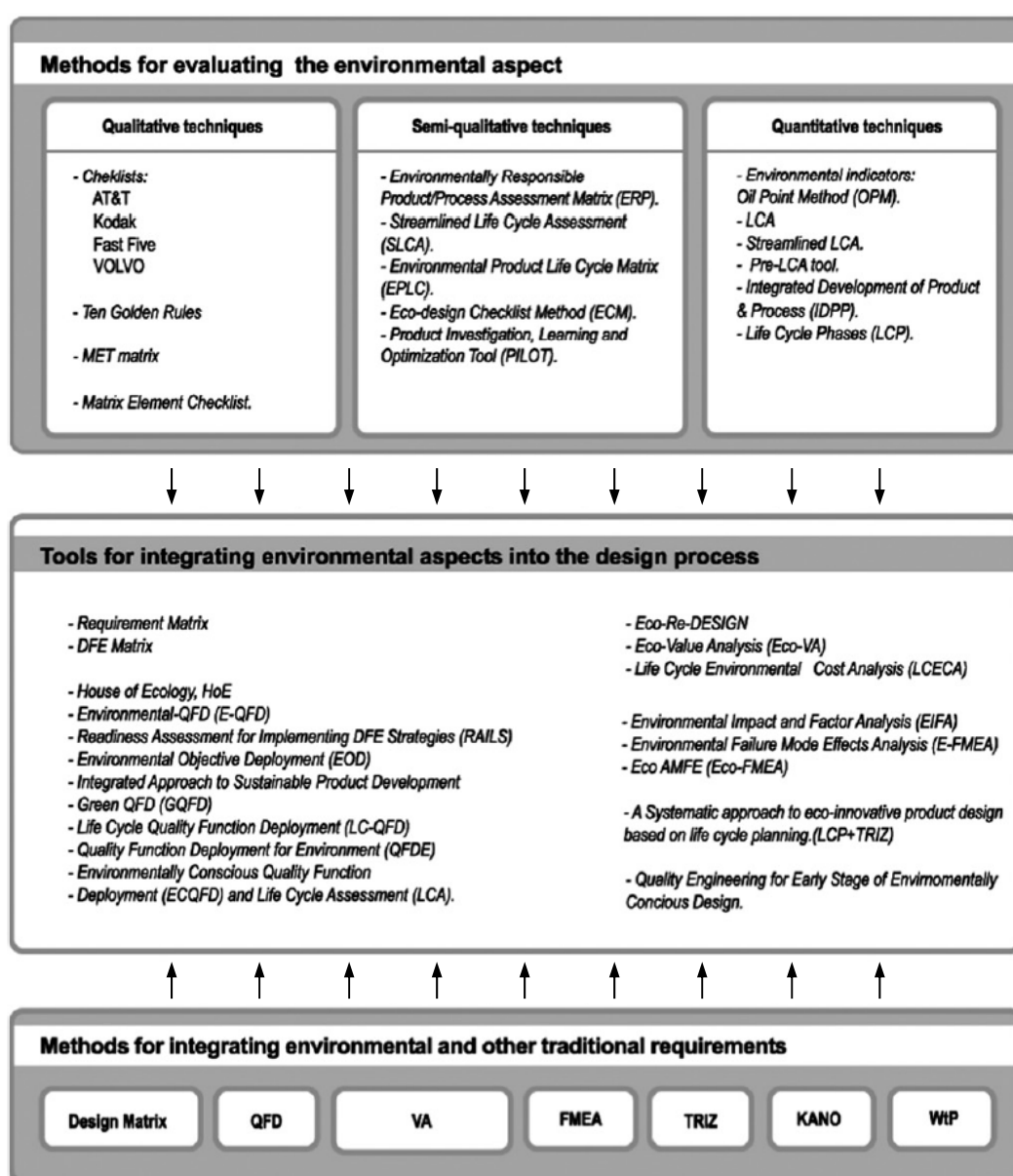


Figura 2.13. Herramientas que combinan evaluación ambiental e integración de requerimientos (Bovea and Pérez-Belis, 2012).

2.2.2. Aplicación de criterios sostenibles

Las metodologías que aplican la sostenibilidad en sus tres dimensiones son, en gran parte, metodologías de Eco-diseño evolucionadas, en las que las actividades a desarrollar y su secuenciación tienen muchos puntos en común con las expuestas anteriormente. **Crul and Diehl, (2009)**, proponen la guía de diseño para la sostenibilidad D4S. El objetivo de la guía es la integración de aspectos de sostenibilidad, para lo cual se apoya en cuatro actividades principales: planteamiento de objetivos, generación de ideas, desarrollo y realización (Figura 2.14).

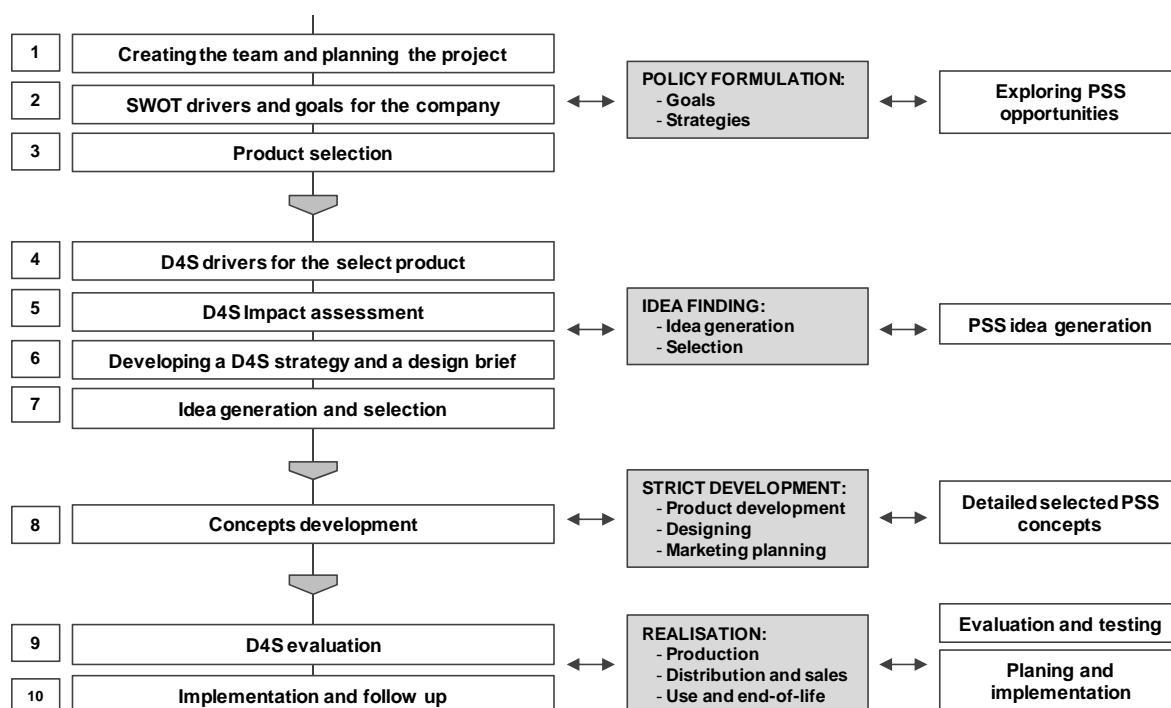


Figura 2.14. Etapas de la guía de diseño para la sostenibilidad D4S (Crul and Diehl, 2009).

Según la guía D4S, el desarrollo de producto sostenible es un proceso formado por 10 etapas. En primer lugar se organiza un equipo de trabajo y se establecen los objetivos del proyecto, que estarán de acuerdo con las estrategias de la empresa y sus planes de negocio. A continuación, se selecciona el producto, se determinan los impulsores internos y externos relevantes y se realiza la evaluación de su impacto identificando cuáles son los más significativos. En la siguiente fase se plantean las estrategias de desarrollo sostenible de producto (se basan en la rueda de LiDS). A partir de estas estrategias, se plantean ideas de mejora, se seleccionan las más prometedoras y se desarrollan en detalle. Se realiza la evaluación del nuevo diseño comprobando si se han producido mejoras con respecto al diseño inicial y finalmente, se hace la planificación de la producción y el lanzamiento del nuevo producto. La metodología contempla sistemas producto-servicio (PSS), de acuerdo con un enfoque que cada vez tiene más en cuenta la presencia de servicios en el proceso de diseño.

Con un enfoque más cercano al de la práctica de la ingeniería, **Gagnon et al. (2012)**, revisan la integración de la sostenibilidad en un proyecto de diseño convencional y recogen diferentes propuestas desarrolladas para transformar un proceso de diseño convencional (CDP) en un proceso de diseño sostenible (SDP). Esto supone, entre otros aspectos, la evaluación de potenciales soluciones en cada una de las dimensiones de la sostenibilidad (ambiental, económica y social) y la utilización de herramientas específicas que deberían ser usadas junto con los planteamientos propios de la práctica ingenieril. Consideran dos grupos de herramientas: las que tienen por objetivo el análisis de soluciones y las que se centran en la síntesis de datos. En el primer grupo se encuentran herramientas que permiten realizar el análisis de impacto en cada una de las dimensiones de la sostenibilidad. En el segundo grupo, herramientas que facilitan la toma de decisión (**Azapagic and Perdan, 2005b**) y que permiten tratar eficazmente la información de los diferentes indicadores así como las especificaciones técnicas propias del diseño

Además, estos autores proponen la aplicación de un proceso de diseño integrado y sostenible (ISED) en el que añaden una serie de tareas complementarias a las tareas ya propuestas en un proceso de diseño sostenible. Estas tareas son indicadas con un asterisco en la Tabla 2.5 y están relacionadas con la definición de un marco de trabajo conceptual de la sostenibilidad que permita abordar el proyecto de diseño de una forma integral.

Planificación y definición del problema
(1) Formar un equipo de diseño multidisciplinar (2) Definir principios de sostenibilidad (3) *Definir un marco de trabajo conceptual de sostenibilidad (4) Identificar cuestiones de sostenibilidad asociadas con el problema a tratar (5) *Identificar relaciones entre el proyecto y los elementos del marco de trabajo conceptual (6) Analizar la involucración de los agentes sociales
Análisis conceptual
(7) Definir criterios de sostenibilidad en línea con las cuestiones de sostenibilidad identificadas (8) *Confirmar la inclusión de los criterios de sostenibilidad en el marco de trabajo conceptual (9) Desarrollar funciones que sean capaces de satisfacer los principios de sostenibilidad (10) *Generar al menos un concepto radicalmente diferente de los convencionales (11) *Definir escenarios en los que probablemente los conceptos evolucionarán (12) Definir indicadores de sostenibilidad en paralelo con especificaciones técnicas (13) *Identificar herramientas que permitan generar datos para evaluar cada indicador (14) Definir el planteamiento de decisión multi-criterio
Diseño preliminar
(15) Evaluar conceptos de acuerdo con los criterios de sostenibilidad (16) Validar el planteamiento de decisión multi-criterio y utilizarlo para seleccionar un concepto (17) *Validar los conceptos bajo los escenarios identificados
Diseño en detalle
(18) Refinar la evaluación del concepto preferente (19) Optimizar su eficacia de acuerdo con los criterios de sostenibilidad (20) *Mejorar la flexibilidad y solidez del concepto seleccionado en diferentes escenarios (21) Comunicar las recomendaciones adecuadas para cada etapa del ciclo de vida (22) Generar un conjunto de indicadores de control

Tabla 2.5. Tareas en un proceso de diseño integrado y sostenible (Gagnon et al., 2012).

LCSA es el marco de trabajo en el que se basan diferentes investigadores para analizar y evaluar la sostenibilidad del ciclo de vida de un producto. **Klöpffer (2008)** propone utilizar y combinar tres técnicas LCA para evaluar las tres dimensiones de la sostenibilidad de un producto. Este planteamiento es denominado LCSA (Life Cycle Sustainability Assessment), consiste en la evaluación de tres ciclos de vida simultáneos en un producto y se expresa como:

$$\text{LCSA} = \text{LCA} + \text{LCC} + \text{S-LCA}$$

LCA se refiere a la evaluación de la dimensión ambiental, LCC evalúa el ciclo de vida económico y S-LCA evalúa los efectos sobre los agentes sociales.

El desarrollo de un LCSA sigue la misma estructura establecida para un LCA (**Valdivia et al., 2013**). Se compone de cuatro fases:

1) Definición de objetivos y alcance.

Si bien cada técnica puede tener sus propios objetivos, es necesario definir un objetivo común. Se define el alcance del estudio, la unidad funcional, los límites del sistema, las categorías de impacto y la asignación de recursos. La selección de los límites del sistema y de la unidad funcional en las tres evaluaciones debería ser consistente e idealmente, la misma. La unidad funcional proporciona una referencia respecto a la cual, las entradas y salidas del sistema pueden ser normalizadas. Cuando un proceso genera más de una salida, se sugiere aplicar proporciones físicas y económicas en la asignación de recursos, tal y como se utiliza en la práctica de cada técnica por separado.

2) Análisis de inventario.

El inventario de sostenibilidad del ciclo de vida (LCSI) cuantifica todas las entradas y salidas del sistema analizado, lo que implica identificar flujos intercambiados y actores implicados. Los datos pueden ser de carácter cuantitativo, semi-cualitativo o cualitativo. En general, LCA y LCC utilizan datos cuantitativos, sin embargo en un S-LCA los datos suelen ser de tipo semi-cuantitativo y cualitativo. La incertidumbre de datos cuantitativos puede ser valorada con métodos estadísticos y la de los datos cualitativos con un análisis de sensibilidad.

3) Evaluación del impacto.

La evaluación del impacto se realiza en las tres dimensiones. Si en el caso de la dimensión ambiental se establecen diversas categorías de impacto y se emplean diferentes metodologías de evaluación, para evaluar aspectos socio-económicos se recomienda la utilización de las categorías y subcategorías propuestas por **UNEP/SETAC (2009)**.

4) Interpretación de resultados.

Para obtener conclusiones del estudio se requiere la detallada presentación en paralelo de los resultados obtenidos. **Valdivia et al., (2013)**, recomiendan hacer un análisis por separado de cada técnica y no realizar la agregación y ponderación de los resultados.

Se trata de un planteamiento que permite abordar las tres dimensiones de la sostenibilidad de una forma sistemática. La aplicación es todavía limitada y se centra en las dimensiones ambiental y económica.

2.3. Metodología para proyectar el desarrollo de productos sostenibles

El marco teórico-práctico expuesto en los apartados anteriores es la base que permite proponer una metodología para proyectar el desarrollo de productos sostenibles.

2.3.1. Etapas de la metodología

Se parte de un modelo genérico de desarrollo de producto que tiene en cuenta todo su ciclo de vida y de una metodología de evaluación de impactos basada en LCSA ("Life Cycle Sustainability Assessment"). Se aplica un enfoque ingenieril que define métricas en paralelo con aspectos técnicos e indicadores cuantitativos adecuados para evaluar la sostenibilidad en cada una de sus dimensiones. Los límites del sistema se establecen en la etapa de producción, por tanto, el análisis de inventario incluye la recopilación de todos los flujos intercambiados a lo largo del proceso productivo. La metodología que se propone pone su centro de atención en el desarrollo de productos y en el planteamiento de alternativas que mejoren la sostenibilidad del diseño inicial. La metodología se compone de 3 etapas (Figura 2.16) y en cada una de ellas se realizan las tareas que se indican a continuación.

1) *Evaluación de la sostenibilidad*

- 1.1. Se selecciona la unidad funcional de acuerdo con el producto analizado.
- 1.2. Se identifican y se cuantifican todas las entradas y salidas asociadas al proceso de producción, analizando la secuencia de operaciones de fabricación, las transformaciones del material, el consumo de recursos y su coste económico. El inventario de producción, es obtenido a través del cálculo de parámetros característicos del proceso (si se proyectado) o bien a través de las correspondientes mediciones en el proceso productivo (si se basa en una producción real).
- 1.3. Se utiliza un conjunto de métricas e indicadores para evaluar los impactos en cada dimensión. Las métricas ingenieriles proporcionan información útil a diseñadores de proceso y son utilizadas para evaluar los indicadores de sostenibilidad.
- 1.4. Se analizan los resultados y se detectan los factores que generan mayor impacto.

2) *Rediseño de producto*

- 2.1. Se proponen diferentes alternativas de rediseño generadas a partir de la aplicación de diferentes estrategias de sostenibilidad. En el planteamiento de estrategias se utilizan los resultados obtenidos en la fase previa y las herramientas de mejora ya desarrolladas en el proceso de eco-diseño.
- 2.2. Se comprueba el cumplimiento de las especificaciones iniciales de producto y se excluyen las alternativas que no las cumplen. Puesto que se revisan las especificaciones globales del producto, se aplica un enfoque que considera todo el ciclo de vida del producto.
- 2.3. Se selecciona la alternativa que genera menor impacto en los indicadores seleccionados.

- 2.4. Se evalúa la sostenibilidad del producto rediseñado considerando el nuevo inventario de producción. Se asume que la compañía fabricante dispone de los recursos necesarios (instalaciones, trabajadores y equipamiento industrial) para desarrollar el proceso de fabricación y que éste se lleva a cabo en serie con un elevado volumen de producción.

3) Comparación de diseños

- 3.1. Se realiza la presentación comparativa del comportamiento sostenible de ambos diseños de producto (inicial y rediseño).
- 3.2. Se utiliza un conjunto de métricas e indicadores característicos de cada dimensión, que previamente fueron evaluados.
- 3.3. Se analizan los resultados y se valoran los cambios producidos. Dependiendo del carácter de los indicadores utilizados en el análisis, una mejora de la sostenibilidad puede estar asociada al incremento o reducción del indicador. En el caso de la dimensión ambiental, los indicadores utilizados expresan impacto negativo, de manera que su reducción será tomada como un resultado favorable.

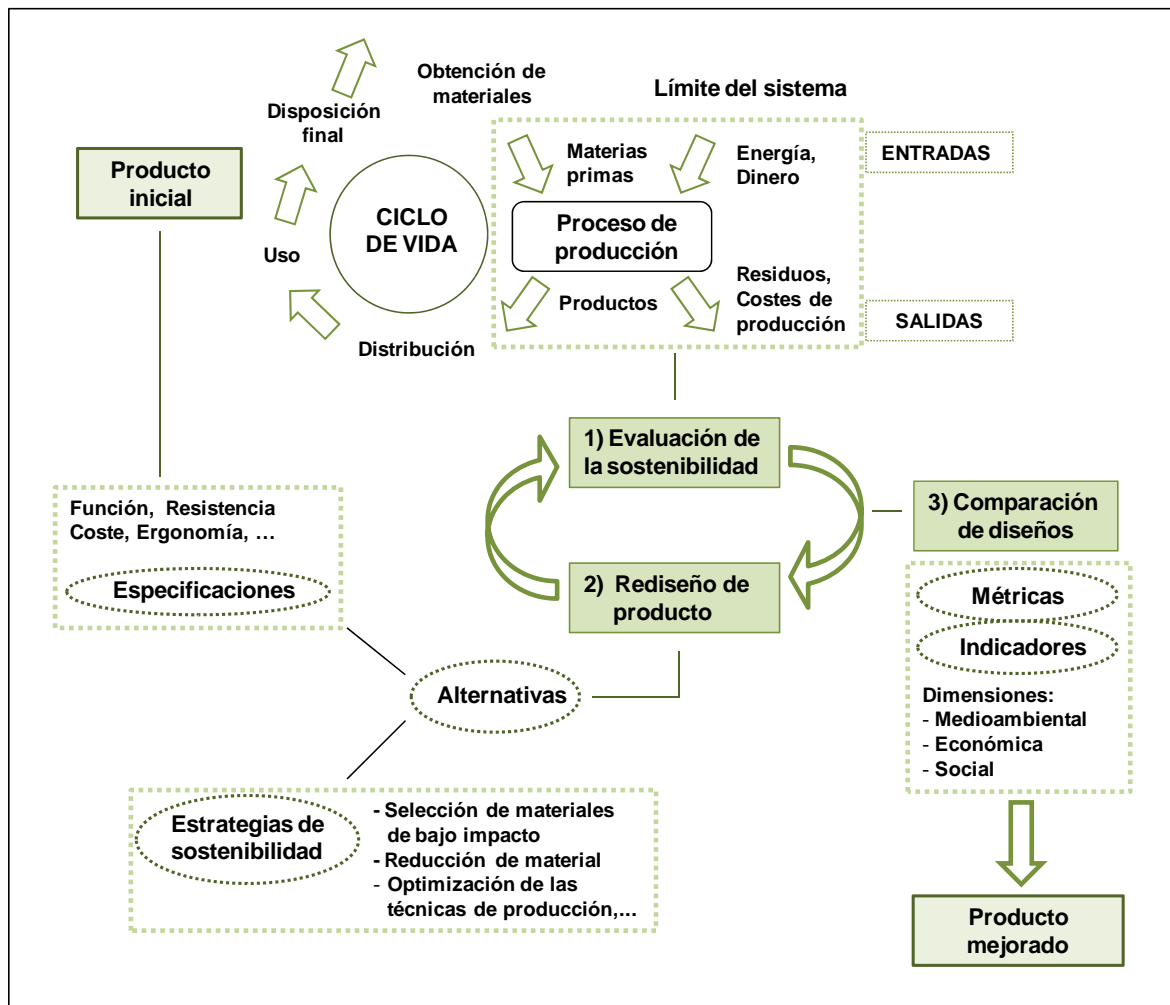


Figura 2.16. Esquema metodológico para proyectar el desarrollo de productos sostenibles.

2.3.2. Métricas ingenieriles

Las métricas cuantifican parámetros del producto y del proceso de producción y permiten evaluar los indicadores de sostenibilidad. Las siguientes métricas son consideradas particularmente útiles para implementar la metodología de desarrollo sostenible de producto expuesta anteriormente:

- **Masa de producto (M_P):** Masa final del producto considerado.
 - La masa puede ser determinada considerando diferentes componentes del producto o diferentes materiales que intervienen en su fabricación. El cálculo y análisis de estas masas parciales (cuya suma es la masa total del producto) permite detectar cuáles son los componentes o materiales del producto que tienen mayor impacto.
 - Utilizando los indicadores ambientales unitarios, el cálculo de la masa de producto permite evaluar cuál es el impacto ambiental debido a su constitución.
 - La masa final del producto también puede ser determinada restando a la masa de materia prima, la masa de material desechado durante el proceso de fabricación y la masa de otros subproductos generados durante la actividad productiva. Los costes asociados a la adquisición de materia prima forman parte de los costes de producción. Por tanto, la masa de producto también interviene en la evaluación de los indicadores económicos de la sostenibilidad.

Masa de producto (M_P)		Unidades: (Kg)
$M_P = \sum_{comp} M_{comp}$	$M_P = \sum_{mat} M_{mat}$	$M_P = M_{MP} - M_{MD} - M_{Subp}$
M_{comp}	Masa de cada componente del producto	
M_{mat}	Masa de cada material diferente del producto	
M_{MP}	Masa de materia prima	
M_{MD}	Masa de material desechado	
M_{Subp}	Masa de subproductos generados durante la actividad	

Tabla 2.6. Cálculo de la masa de producto.

- **Volumen de producto (V_P):** Volumen final del producto considerado.
 - Se considera el producto terminado y empaquetado que será transportado a la siguiente etapa de la cadena de desarrollo o distribuido a los puntos de comercialización.
 - El cálculo del volumen se puede realizar mediante cálculos geométricos o a partir de la masa y la densidad del producto.
 - El volumen final depende de cómo se va a distribuir el producto. Puede ser montado o desmontado, con embalaje parcial o completo, lo cual influye en las etapas finales del proceso productivo.
 - Por otra parte, la masa y el volumen del producto son determinantes en la evaluación de los indicadores ambientales y económicos en la etapa de transporte y distribución de producto. Intervienen en la selección de alternativas teniendo en cuenta un enfoque global.

- **Energía en producción (E_{Pr}):** Energía consumida en la fabricación del producto.
 - El consumo de los equipos y máquinas utilizados en operaciones productivas interviene de manera directa en la evaluación de indicadores ambientales y en la determinación de los costes de producción.
 - La energía consumida puede ser expresada considerando la fabricación de diferentes partes/componentes del producto o el procesado de diferentes materiales.
 - También se puede expresar considerando diferentes operaciones o procesos utilizados durante la fabricación.
 - En función del producto, se seleccionan para el análisis las métricas obtenidas a partir de energías parciales más apropiadas.

Energía en producción (E_{Pr})		Unidades: (Kw·s)	
$E_{Pr} = \sum_{comp} E_{comp}$	$E_{Pr} = \sum_{mat} E_{mat}$	$E_{Pr} = \sum_{proc} E_{proc}$	
E_{comp}	Energía consumida en la fabricación de cada componente del producto		
E_{mat}	Energía requerida para procesar cada material diferente del producto		
E_{proc}	Energía consumida en diferentes procesos de fabricación del producto		

Tabla 2.7. Cálculo de la energía consumida en producción.

- **Masa de material desechado (M_{MD}):** Cantidad de material que se elimina de la materia prima inicial durante el proceso de fabricación del producto.
 - La masa de material desechado se puede expresar, como en otras métricas, considerando diferentes componentes del producto o diferentes materiales que intervienen en su fabricación.
 - La utilización eficiente de materia prima en el proceso productivo se evalúa con la métrica (**%Res**), que se expresa de forma porcentual.
 - A partir de los indicadores ambientales unitarios se puede evaluar cuál es el impacto ambiental del material desechado durante la fabricación.
 - También interviene en la evaluación de indicadores económicos ya que los costes asociados a la adquisición de materia prima y, por tanto, los costes de producción dependen de la cantidad de material desechado en el proceso.

Masa de material desechado (M_{MD})		Unidades: (Kg)	
$M_{MD} = \sum_{comp} M_{MD_comp}$	$M_{MD} = \sum_{mat} M_{MD_mat}$	$\%Res = \frac{M_{MD}}{M_{MP}} \times 100$	
M_{MD_comp}	Masa de material desechado en la fabricación de cada componente del producto		
M_{MD_mat}	Masa de material desechado en cada material diferente del producto		
M_{MP}	Masa de materia prima		

Tabla 2.8. Cálculo de la masa de material desechado.

- **Costes de producción (C_{Pr}):** Presupuesto de fabricación del producto.
 - La determinación de los costes de producción, una vez establecidos los ingresos por ventas, permite evaluar los indicadores que caracterizan la dimensión económica de la sostenibilidad.
 - Los costes de producción se pueden clasificar siguiendo diferentes criterios (costes fijos y variables, costes directos e indirectos,...). En este caso, se ha optado por desglosar los costes según la naturaleza de los mismos considerando cinco bloques (**Tabla 2.4**).
 - El cálculo y análisis de estos costes parciales permite detectar cuáles son los factores que tienen una contribución más importante en el presupuesto final de fabricación del producto.
 - La determinación de los costes requiere la utilización de tablas de precios para diferentes tipos de producto o servicio y tablas salariales.

Costes de producción (C_{Pr})		Unidades: (€)
$C_{Pr} = C_{MP} + C_{MO} + C_{Cons} + C_{ind} + C_{Am}$		
C_{MP}	Coste de la materia prima utilizada en la fabricación del producto	
C_{MO}	Coste de la mano de obra empleada en la fabricación del producto	
C_{Cons}	Coste de los consumibles utilizados	
C_{ind}	Costes indirectos	
C_{Am}	Costes de amortización	

Tabla 2.9. Cálculo de los costes de producción.

- **Producción (Pr):** unidades de producto fabricadas en un periodo de tiempo.
 - Optimizar la producción requiere planificar adecuadamente las actividades del proceso de fabricación de acuerdo a los recursos disponibles en la instalación productiva.
 - La asignación de un recurso al desarrollo del producto puede ser completa, si se dedica exclusivamente, o parcial, si se comparte con otros productos.
 - La producción promedio es función del tiempo promedio de fabricación, y éste, a su vez, de los tiempos empleados en cada etapa del proceso productivo (t_{proc}).
 - Determinar la producción permite evaluar los indicadores que caracterizan la dimensión social de la sostenibilidad, considerando la categoría de los trabajadores.
- **Tiempo de proceso (t_{proc}):** tiempo que requiere cada proceso que interviene en la fabricación de una unidad de producto. Incluye el tiempo de las diferentes operaciones que se desarrollan en el proceso para realizar todos y cada uno de los componentes que forma parte del producto.
- **Desgaste de herramienta (D_h):** Masa que pierde una herramienta durante un proceso de mecanizado. Permite evaluar cuál es el impacto ambiental asociado a su utilización. En función del tiempo de vida y el tiempo de proceso, se obtiene el número de herramientas necesarias y el coste asociado de consumibles.

2.3.3. Indicadores de sostenibilidad

Los indicadores evalúan cada una de las dimensiones de la sostenibilidad y permiten comparar diferentes diseños de producto. Se han seleccionado los siguientes indicadores:

Dimensión ambiental:

- ***Potencial de calentamiento global (GWP₁₀₀)***
 - Es un indicador de la alteración de la temperatura global del planeta causada por los gases de efecto invernadero. El aumento de la temperatura genera anomalías climáticas y una disminución de la biodiversidad.
 - Se define como la relación entre la contribución a la absorción de calor que resulta de la emisión de 1 Kg de gas de efecto invernadero y la emisión equivalente de CO₂, considerando un horizonte de tiempo de 100 años.
- ***Eco-indicador 99 (EI99)***
 - Indicador que agrega y expresa de forma ponderada el impacto en diferentes categorías.
 - Considera tres grupos de daño: salud humana, calidad del ecosistema y recursos.
 - Útil en estudios de comparación y optimización.
- ***Energía Global (GE)***
 - Energía consumida por un recurso a lo largo del ciclo de vida.
 - Contempla tanto la energía eléctrica consumida en las diferentes operaciones, como el valor calorífico neto del recurso. Cuantifica el agotamiento de recursos energéticos.
- ***Acidificación (Ac)***
 - Reducción del pH debido a emisiones de gases ácidos.
 - Gases como los óxidos de nitrógeno (NO_x) y de azufre (SO_x) reaccionan con el agua en la atmósfera para formar lluvia ácida. Cuando se deposita causa el deterioro del ecosistema y una reducción en la biodiversidad.
- ***Eutrofización (Eu)***
 - Acumulación de nutrientes en sistemas acuáticos.
 - Genera un excesivo crecimiento de biomasa y una reducción en la calidad del agua y en la población de animales (daño en la calidad del ecosistema, según método 'endpoint').
 - Está causada por las emisiones de amoníaco, nitratos, óxidos de nitrógeno y fósforo (al aire o al agua).

En este trabajo se han utilizado estos indicadores. No obstante, en función del producto objeto de estudio se puede ampliar el número de categorías a evaluar.

Como se muestra en la Tabla 2.10, un indicador ambiental (Ind_{amb}) se puede calcular a partir del indicador unitario correspondiente $(Ind_{amb})_{unit}$. Los indicadores unitarios se obtienen desde diferentes bases de datos y se expresan por unidad de cada entrada que interviene en el cálculo. Las bases de datos utilizadas en este trabajo han sido Probas, MEEuP y Agri-footprint y los métodos de evaluación aplicados, EI99 ('endpoint') y CML ('midpoint'). Se remite a estas bases de datos y a las metodologías de evaluación para conocer los factores de ponderación o normalización que tienen que ser utilizados en cada caso.

Indicadores ambientales	
$Ind_{amb} = \sum_{ent} [(Ind_{amb})_{unit} \cdot ent]$	
$(Ind_{amb})_{unit}$ ent	Indicador ambiental unitario Entrada de cálculo (por ej. masa de un material)
GWP₁₀₀ EI99 GE Ac Eu	Se expresa en Kg de CO ₂ equivalente. Se expresa en puntos (Pt) o milipuntos (mPt). Se expresa en MJ. Se expresa en Kg de SO ₂ equivalente Se expresa en Kg de PO ₄ ³⁻ equivalente
Bases de Datos	
Probas (UBA, 2007) Base de Datos proporcionada por la Agencia alemana de protección del Medio Ambiente (Umweltbundesamt - UBA). Incluye procesos unitarios y agregados, para los siguientes temas: energía, materiales y productos, servicios de transporte y residuos. ProBas+ es una extensión de ProBas que contiene 1800 conjuntos de datos adicionales, actualizaciones de datos, correcciones para procesos de transporte y una mejor vinculación de procesos y estructura de datos.	
MEEuP (Kemna et al., 2005) Software libre de análisis de ciclo de vida, que incluye su propia base de datos con alrededor de 100 materiales y procesos relacionados con productos que consumen energía. Se crea en 2009 por iniciativa de la Unión Europea, al actualizar la normativa 2009/125/EC de nuevos productos energéticos, y da lugar a una metodología para el eco-diseño de productos que utilizan energía.	
Agri-footprint (Durlinger et al., 2017) Base de datos desarrollada por Blonk Consultants (compañía holandesa), específica del sector de la agricultura y de la alimentación que contiene datos sobre alimentación, comida y biomasa. Se crea en 2014 y realiza actualizaciones sucesivas. Contiene aproximadamente 5000 productos y procesos. Es utilizada en los principales software LCA, pero también proporciona información de forma libre.	
Metodologías	
EI99 (Goedkoop and Spriensma, 2000; VROM, 2000) CML (Guinée et al., 2001)	

Tabla 2.10. Cálculo de indicadores ambientales y Bases de Datos utilizadas.

Dimensión económica:

- **Valor añadido (VA)**

- Es un indicador orientado a mostrar el resultado económico de la actividad productiva.
- Se obtiene a partir de la diferencia de los ingresos derivados de la actividad productiva y los costes de producción. Representa el beneficio obtenido de la actividad industrial.
- Si se fijan los ingresos, el valor añadido depende de los costes de producción y de cada uno de los diferentes tipos de costes que intervienen en su evaluación.

Valor añadido (VA)		Unidades: (€)
$VA = Ing - C_{Pr}$		
Ing	Ingresos derivados de la actividad productiva	
C _{Pr}	Costes de producción	

Tabla 2.11. Cálculo del valor añadido.

- **Eco-eficiencia (EE)**

- Se obtiene como el cociente entre VA (indicador económico) y EI99 (indicador ambiental), por tanto, relaciona dos dimensiones de la sostenibilidad. Se pueden considerar otros indicadores ambientales, como GWP₁₀₀, para expresar esta relación.
- Representa la obtención de resultados económicos de la actividad industrial frente al impacto ambiental que genera el desarrollo de esa actividad.

Eco-eficiencia (EE)		Unidades: (€/pt)
$EE = \frac{VA}{EI99}$		
VA	Indicador económico de valor añadido	
EI99	Indicador ambiental 'endpoint'	

Tabla 2.12. Cálculo de la Eco-eficiencia.

- **Rentabilidad sobre activos (RSA)**

- Se obtiene como el cociente entre VA y el activo medio (Act_{maq}), para un periodo dado (normalmente un ejercicio anual).
- Representa la rentabilidad obtenida respecto a la inversión realizada en maquinaria.

Rentabilidad sobre activos (RSA)		
$RSA = \frac{VA}{Act_{maq}}$		
VA	Valor añadido	
Act _{maq}	Valor del activo en equipos y maquinaria	

Tabla 2.13. Cálculo de la Rentabilidad sobre activos.

Dimensión social:

- **Tiempo de trabajo (T_t):**

- Tiempo promedio de trabajo por unidad de producto fabricada.
- Se obtiene a partir de la planificación de la producción.
- Es función de los tiempos empleados en cada etapa del proceso productivo (t_{proc}), de la secuenciación de tareas y operaciones de fabricación y de la asignación de los recursos disponibles en la instalación.

Tiempo de trabajo (T_t)		Unidades: (h)
$T_t = \frac{\sum t_{trab}}{N}$		
t_{trab}	Tiempo empleado por cada trabajador en la fabricación del producto	
N	Número de trabajadores	

Tabla 2.14. Cálculo del tiempo de trabajo.

- **Salario hora (S_h):**

- Representa el salario de los trabajadores que intervienen en la fabricación del producto por unidad de tiempo trabajada.
- También expresa el coste de cada hora de trabajo en el proceso productivo.
- Este indicador se obtiene a partir de los costes de la mano de obra y la producción.

Salario hora (S_h)		Unidades: (€/h)
$S_h = C_{MO} \cdot Pr$		
C_{MO}	Coste de la mano de obra en cada producto	
Pr	Producción	

Tabla 2.15. Cálculo del salario hora.

De acuerdo con la clasificación de categorías de impacto basada en agentes sociales que establece **UNEP/SETAC (2009)**, se ha seleccionado para la investigación la categoría de los trabajadores y como indicadores el tiempo de trabajo y el salario/hora, los cuales permiten evaluar cuantitativamente el impacto sobre esta categoría.

Los indicadores definidos (ambientales y socio-económicos) se consideran especialmente útiles para desarrollar la metodología planteada por dos motivos: pueden ser utilizados en el estudio de productos muy diversos y se evalúan de forma cuantitativa.

En la Tabla 2.16, se enumeran todas las métricas e indicadores utilizados para evaluar la sostenibilidad del producto en la etapa de producción.

Métricas ingenieriles					
Métricas utilizadas en el análisis comparativo de diseños:					
Masa de producto	Volumen de producto	Energía en producción	Porcentaje de residuo	Costes de producción	Producción
M_P (Kg)	V_P (m ³)	E_{Pr} (Kw·s)	%Res	C_{Pr} (€)	Pr (ud/h)

Indicadores de sostenibilidad					
Indicadores utilizados en el análisis comparativo de diseños:					
Dimensión medioambiental		Dimensión económica		Dimensión social	
Potencial de calent. global	Eco-indicador 99	Valor añadido	Eco-eficiencia	Tiempo de trabajo	Salario hora
GWP ₁₀₀ (Kg CO ₂ -eq)	EI99 (pt)	VA (€)	EE (€/pt)	T_t (h)	S_h (€/h)

Métricas complementarias	
Métricas utilizadas en el estudio de cada diseño:	
M_{comp}	Masa de cada componente que forma parte del producto
M_{mat}	Masa de cada material que forma parte del producto
M_{MP}	Masa de materia prima empleada en la fabricación del producto
M_{MP_comp}	Masa de materia prima empleada en la fabricación de cada componente
M_{MP_mat}	Masa de materia prima correspondiente a cada material
M_{MD}	Masa de material desechado durante la fabricación del producto
M_{MD_comp}	Masa de material desechado en la fabricación de cada componente
M_{MD_mat}	Masa de material desechado en el procesado de cada material
D_h	Masa que pierde una herramienta durante un proceso de mecanizado
E_{comp}	Energía consumida en la fabricación de cada componente del producto
E_{mat}	Energía requerida para procesar cada material que forma parte del producto
E_{proc}	Energía consumida en cada proceso de fabricación
t_{proc}	Tiempo empleado en cada proceso de fabricación
t_{comp}	Tiempo empleado en la fabricación de cada componente del producto
t_{trab}	Tiempo empleado por cada trabajador en la fabricación del producto
C_{Pr_comp}	Costes de producción asociados a cada componente del producto
C_{Pr_mat}	Costes de producción asociados a cada material del producto
C_{MP}	Coste de la materia prima adquirida para fabricar el producto
C_{MP_mat}	Coste de la materia prima correspondiente a cada material
C_{MP_comp}	Coste de la materia prima adquirida para fabricar cada componente
Pr_{MP_mat}	Precio de la materia prima correspondiente a cada material
Pr_{MP_comp}	Precio de la materia prima adquirida para fabricar cada componente
C_{MO}	Coste de la mano de obra empleada en la fabricación del producto
C_{Cons}	Coste de consumibles utilizados en la fabricación del producto
C_{Ind}	Costes indirectos asociados a la fabricación del producto
C_{Am}	Costes de amortización de equipos y maquinaria asociados a la producción
Act_{maq}	Valor del activo en equipos y maquinaria
Ing	Ingresos derivados de la actividad productiva

Tabla 2.16. Resumen de métricas ingenieriles e indicadores de sostenibilidad utilizados.

Glosario de acrónimos

AHP	Analytic Hierarchy Procedure
CDP	Conventional Design Product
D4S	Design for Sustainability
DfA	Design for Assembly/Disassembly
DfE	Design for Environment
DfM	Design for Manufacturing
DfMt	Design for Maintenance
DfQ	Design for Quality
DfR	Design for Reliability
DfRec	Design for Recyclability
DfX	Design for "X"
EDIP	Environmental Design of Industrial Product
EOD	Environmental Objectives Deployment
ESQCV	Simplified and Qualitative Life Cycle Analysis
FMEA	Failure Mode and Effect Analysis
GaBi	Ganzheitliche Bilanzierung
G-QFD	Green Quality Function Deployment
ISED	Integrated Sustainable Engineering Design Process
ISO	International Organization for Standardization
LCA	Life Cycle Assessment
LCC	Life Cycle Cost
LCSA	Life Cycle Sustainability Assessment
LCSI	Life Cycle Sustainability Inventory
LiDS	Life Cycle Design Strategies Wheel
MECO	Environmental Assessment Matrix
MEEuP	Method for the Evaluation of Energy-using Products
MET	Materials, Energy and Toxic emissions
MIPS	Material Intensity Per Service Unit
PSS	Product-Service System
QFD	Quality Function Deployment
QFDE	Quality Function Deployment for Environment
SDP	Sustainable Design Process
SETAC	Society of Environmental Toxicology and Chemistry
SFCM	Specification-factors-concepts Matrix
SimaPro	System for Integrated Environmental Assessment of Products
S-LCA	Social Life Cycle Assessment
SMART	Simple Multi-Attribute Rating Technique
TRIZ	Theory of Inventive Problem Solving
UNEP	United Nations Environment Programme
VA	Value added
VOC	Voice of Customer
WtP	Willingness to Pay

Capítulo 3.

Casos de Estudio

La metodología expuesta previamente se pone en práctica a través de una serie de casos de estudio con el objetivo de analizar el proceso metodológico y proyectar productos sostenibles.

En el Caso 1, se hace el estudio de un seguidor solar utilizado en instalaciones de baja potencia. El análisis se centra en los componentes principales del sistema mecánico y el proceso de rediseño se realiza a partir del proyecto de desarrollo de producto, aplicando de forma sistemática cada etapa de la metodología.

En el Caso 2, el producto estudiado es un contenedor isoterma para el almacenamiento y transporte de alimentos. El análisis se basa en los materiales utilizados y las estrategias de rediseño se centran en reducir su impacto. El estudio se realiza en colaboración con una empresa dedicada a la fabricación de equipamiento industrial.

En el Caso 3, el producto objeto de estudio es un aerógrafo de gravedad y doble acción. La metodología de desarrollo sostenible se implementa como un proceso iterativo formado por dos ciclos de rediseño a través valorando la evolución gradual del producto. Además, se propone la evaluación de un conjunto más amplio de métricas e indicadores.

En el Caso 4, se aborda la obtención de leche en una explotación real de ganado vacuno. El proceso metodológico se aplica a un producto y una instalación productiva con unas características notablemente diferentes a los casos anteriores. El análisis se centra en la materia prima que forma parte de la alimentación.

CASO 1 - SEGUIDOR SOLAR

Un seguidor solar es un dispositivo que soporta y orienta una o varias placas solares con el objetivo de que los rayos de sol incidan lo más perpendicularmente posible sobre las placas y aumenten su rendimiento. Para orientar una placa solar se utilizan dos coordenadas: el ángulo de azimut (φ) que representa el movimiento diario del sol, de este a oeste, y el ángulo polar (ϕ) que representa la altura o elevación estacional del sol.

En función de su movilidad se consideran dos grupos de seguidores solares: de un eje y de dos ejes (Figura C1.1). El primer grupo se caracteriza por tener un grado de libertad, el cual corresponde al giro respecto a un eje. Éste puede ser horizontal, vertical o tener la inclinación del ángulo polar. Este tipo de seguidor puede montarse en parques solares, cubiertas, instalaciones medianas y domésticas. El rendimiento depende de la latitud. El segundo grupo es el de los seguidores de dos ejes, que se caracteriza por tener dos grados de libertad (giro respecto a los ejes horizontal y vertical), lo que permite orientar adecuadamente la placa solar al movimiento del sol y aumentar la captación de energía hasta un 34%. Suelen soportar mayor cantidad de placas y se montan en grandes parques solares.

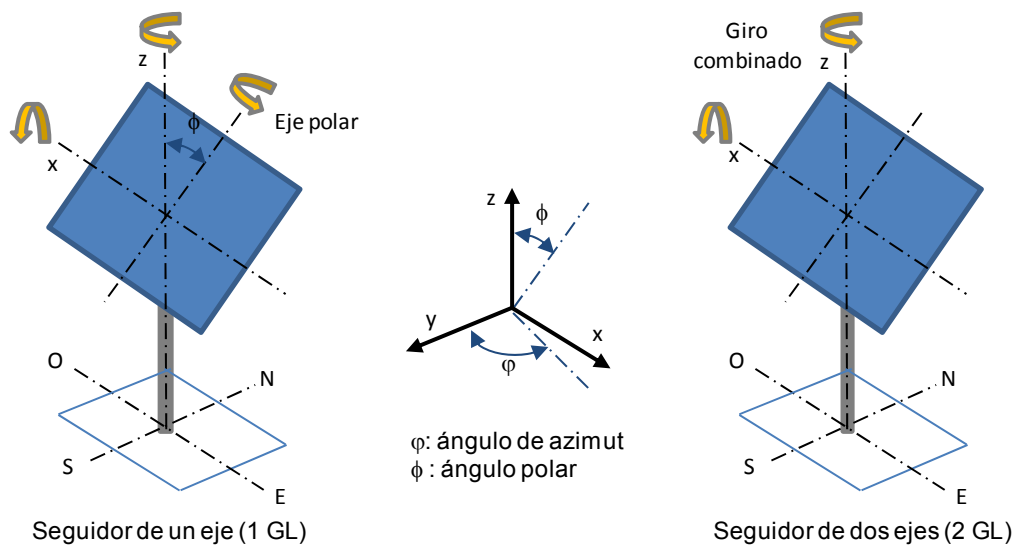


Figura C1.1. Tipos de seguidores solares.

Características y especificaciones del producto

En este caso se analiza un seguidor solar de un eje con la inclinación del ángulo polar. Puede montar una placa de 2 m^2 y es utilizado en instalaciones domésticas y de baja potencia. Dispone de un mecanismo que permite el seguimiento diario del sol y es controlado a través de una estación central ubicada en un lugar protegido, habitualmente, lejos del seguidor.

El seguidor solar objeto de estudio está formado por 8 componentes principales, tal y como se muestra en la Figura C1.2. El mástil (1) proporciona una altura adecuada de operación y transmite los esfuerzos mecánicos hasta el punto de fijación. La placa solar se monta sobre una estructura soporte formada por dos brazos (2), unidos por un eje central (3). A través de un mecanismo alojado en la carcasa (4), el eje gira y la placa solar montada en la estructura soporte puede seguir el movimiento diario del sol. La unión de esta estructura con el mástil se hace con el componente (5), denominado regulador de elevación ya que a través de unas ranuras situadas en los laterales permite modificar manualmente la altura de elevación. Todos los detalles constructivos se pueden consultar en el trabajo de **Lacasa (2012)**.

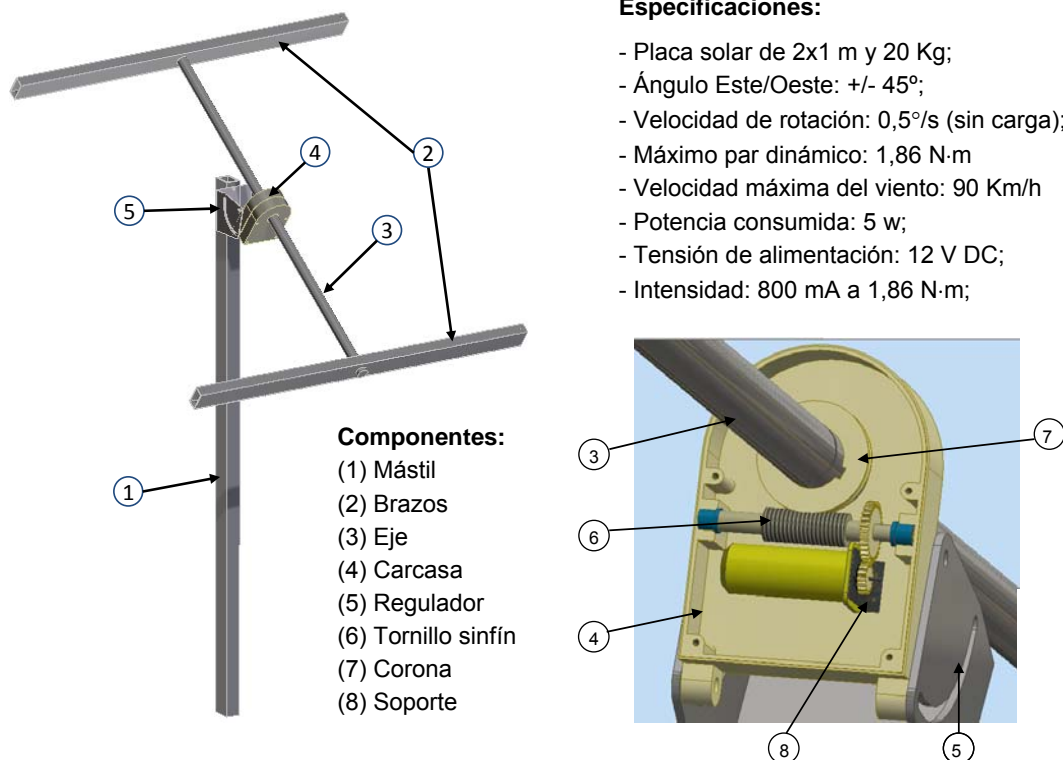


Figura C1.2. Seguidor solar objeto de estudio - Componentes y características.

El funcionamiento del seguidor solar se controla a través de una estación central que envía de forma periódica instrucciones de movimiento al motor alojado en la carcasa. El motor transmite el giro a través de un sistema de tornillo sinfín (6) y corona (7) y se fija en la carcasa con una pieza soporte (8). Se considera una producción industrial que desarrolla por separado los componentes mecánicos y los componentes electrónicos. El proceso de rediseño sostenible del producto se centra únicamente en los componentes del sistema mecánico marcados en la **Figura C1.2**. En esta figura se indican las especificaciones del dispositivo en condiciones nominales de trabajo o frente a un par máximo. Puesto que el seguidor opera a la intemperie, los componentes deberán tener elevada resistencia a la corrosión.

PROCESO DE REDISEÑO SOSTENIBLE

Fase 1a - Evaluación de la sostenibilidad (diseño inicial)

▪ *Inventario de producción*

En esta etapa se recopilan todos los datos necesarios para llevar a cabo la fabricación de los principales componentes mecánicos del seguidor solar (marcas 1-8). Se realizan las siguientes operaciones: corte con sierra, torneado, fresado, taladrado, corte con cizalla y doblado de chapa, moldeo por inyección, montaje y embalaje final del producto. Se procesan 5 tipos diferentes de materiales: aceros AISI-304N y S275JR (galvanizado), aleación de aluminio Al6066T4, nylon 66/6 y PP4062 (polipropileno para moldeo por inyección). Este último se adquiere en granza y el resto de materiales, en forma de perfil, barra o chapa de dimensiones comerciales. La secuencia de operaciones necesaria para realizar cada componente, el tiempo y la energía consumida en cada operación, el residuo generado y el desgaste que experimentan las herramientas utilizadas se detallan en el Anexo C1 de este documento. El desarrollo de los cálculos y los resultados obtenidos en relación con las operaciones que intervienen en el proceso de fabricación se basa en el trabajo previo de **Lacasa (2012)**.

A continuación, se resumen los principales datos que intervienen en el inventario de producción. En la Tabla C1.1 se muestran, para cada componente del producto, tres bloques de información: el relacionado con la materia prima empleada en la fabricación, donde se indica tipo de material y sus dimensiones; el relacionado con el proceso de fabricación, que incluye datos de la energía consumida y del material desechado; y el último bloque en el que se indica la masa final de ese componente en el producto terminado.

Componente	Materia Prima		Proceso de fabricación		Producto
	Material	Dimensiones (mm)	E_{comp} (Kw·s)	M_{MD_comp} (Kg·10 ⁻³)	M_{comp} (Kg)
(1) Mástil	S275JR g	Perfil hueco 60x40x5	5,02	15	10,58
(2) Brazos	Al 6066T4	Perfil hueco 60x30x2	2,41	18	1,97
(3) Eje	S275JR g	Barra, Ø30	10,15	7	6,37
(4) Carcasa	PP 4062	Pellet	340,9	18	0,28
(5) Regulador	AISI 304N	Chapa, t=3	244,2	80	0,94
(6) Sinfín	Nylon 66/6	Barra, Ø20	32,18	17	0,02
(7) Corona	Nylon 66/6	Barra, Ø65	20,66	12	0,017
(8) Soporte	S275JR	Chapa, t=1	2,59	6	0,025

Tabla C1.1. Seguidor solar - Diseño inicial. Datos del proceso productivo de cada componente.

En la Tabla C1.2 se indica, para cada uno de los procesos de fabricación, el tiempo total empleado en la obtención de una unidad de producto, la energía consumida y el desgaste que experimentan las herramientas en operaciones de mecanizado.

Proceso	Máquina	Nº	t_{proc} (s)	E_{proc} (Kw·s)	D_h (Kg·10 ⁻³)
Corte	Sierra de cinta HB280B	1	13,9	2,9	3,47
Torneado	Torno CNC Proton 560/1500	1	194,1	32,4	1,30
Fresado	Fresadora 350GP	2	571,9	454,7	3,37
Perforado	Taladro manual GBM 10RE	1	37,4	11,2	0,45
Corte	Cizalladora pendulante KMT 1350	1	5	0,29	-
Plegado	Dobladora hidráulica 120T	1	3	0,0007	-
Inyección	Máquina de inyección Spartan	1	240	156,5	-

Tabla C1.2. Seguidor solar - Diseño inicial. Datos del proceso productivo.

En la **Figura C1.6** se muestra un esquema del proceso productivo, con las entradas y salidas que intervienen en el sistema. Se indica la cantidad de cada uno de los materiales utilizados en el proceso de fabricación y el producto final resultante ya empaquetado para su distribución y venta. Se muestran los consumos de energía en cada máquina y el consumo global de energía a lo largo del proceso productivo. El inventario material se completa con la indicación del porcentaje de material desechado. Además se muestran los principales flujos económicos intercambiados en el proceso de producción. En la Tabla C1.3 se muestra el coste de la materia prima empleada en la fabricación de cada componente. El coste total de materia prima que incluye tornillería, casquillos antifricción y sistemas de fijación 'hook' utilizados en el montaje del conjunto, así como el detalle del presupuesto de fabricación se puede consultar en el Anexo C1.

Componente	Tipo de materia prima	Cantidad	Pr_{MP_comp} (€/ud)	C_{MP_comp} (€)
(1) Mástil	S275JR g - perfil 60x40x5	1,5 m	8,91	13,37
(2) Brazos	Al 6066T4 - perfil 60x30x2	2,1 m	4,8	10,09
(3) Eje	S275JR g - barra, Ø30	1,15 m	6,53	7,50
(4) Carcasa	PP 4062 - pellet	0,279 Kg	0,70	0,20
(5) Regulador	AISI 304N - chapa, t=3	0,046 m ²	36,59	1,69
(6) Sinfín	Nylon 66/6 - barra, Ø20	0,104 m	2,80	0,29
(7) Corona	Nylon 66/6 - barra, Ø65	0,007 m	18,64	0,13
(8) Soporte	S275JR - chapa, t=1	0,001 m ²	7,68	0,008

Tabla C1.3. Seguidor solar - diseño inicial. Coste de la materia prima para cada componente.

▪ **Evaluación de indicadores**

Una vez realizado el inventario de producción se determinan las métricas ingenieriles y se calculan los indicadores de sostenibilidad del diseño inicial. Los resultados se muestran en la Tabla C1.4.

El producto empaquetado (se comercializa desmontado) tiene una masa de 21,8 Kg y un volumen de 0,048 m³. La energía consumida en cada una unidad fabricada es de 658,2 Kw·s. La cantidad de material desechado (1,43%) es un porcentaje muy reducido de la materia prima adquirida. Los costes de producción son de 108,3 € y la producción es de 6,9 unidades/hora. La instalación dispone de 8 trabajadores en total y el número de máquinas de cada tipo se detalla en la **Tabla C1.2**. Se ha considerado una producción en serie y una asignación del 100% en los recursos disponibles (menos un trabajador que está al 50%). La planificación de operaciones de fabricación realizada con estos recursos se detalla en el Anexo C1.

Métricas ingenieriles					
M _P (Kg)	V _P (m ³)	E _{Pr} (Kw·s)	%Res	C _{Pr} (€)	Pr (ud/h)
21,8	0,048	658,2	1,43	108,3	6,9
Indicadores de sostenibilidad					
Dimensión medioambiental		Dimensión económica		Dimensión social	
GWP ₁₀₀ (Kg CO ₂ -eq)	EI99 (pt)	VA (€)	EE (€/pt)	T _t (h)	S _h (€/h)
22,87	6,51	8,7	1,34	0,136	88,06

Tabla C1.4. Seguidor solar - Diseño inicial. Métricas ingenieriles e indicadores de sostenibilidad.

El cálculo de indicadores muestra que la fabricación de cada unidad de producto supone la emisión de 22,87 Kg CO₂-eq y genera un EI99 de 6,51 pt. De acuerdo con unos ingresos/unidad de 117 € se obtiene un valor añadido de 8,7 €. La Eco-eficiencia es, por tanto, de 1,34 €/pt. En cuanto a los indicadores sociales, el tiempo empleado por trabajador en la fabricación de cada unidad de producto es 0,136 h y el salario de los trabajadores es 88,06 €/h.

Los cálculos realizados para obtener los indicadores ambientales considerando materiales y proceso de fabricación en dos bloques separados, se pueden consultar en el Anexo C1. Además, se muestran datos de otros indicadores ambientales. Se puede comprobar que la masa de los componentes supone la mayor parte del impacto ambiental y otros factores como el material desechado, la energía consumida y la utilización de consumibles durante el proceso productivo tienen una contribución muy reducida (inferior al 3%). A continuación, se detalla la distribución del impacto por componentes del seguidor. La Figura C1.3 muestra cuál es la contribución de cada componente a los indicadores GWP₁₀₀ y EI99 y la Figura C1.4 muestra cómo se distribuyen los tiempos y costes de producción.

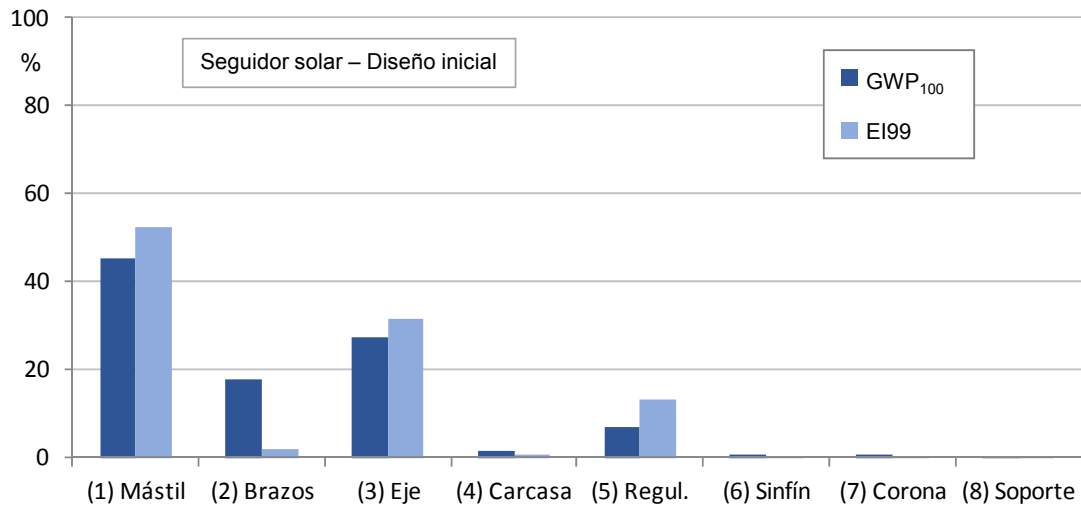


Figura C1.3. Distribución del impacto ambiental de los componentes del seguidor.

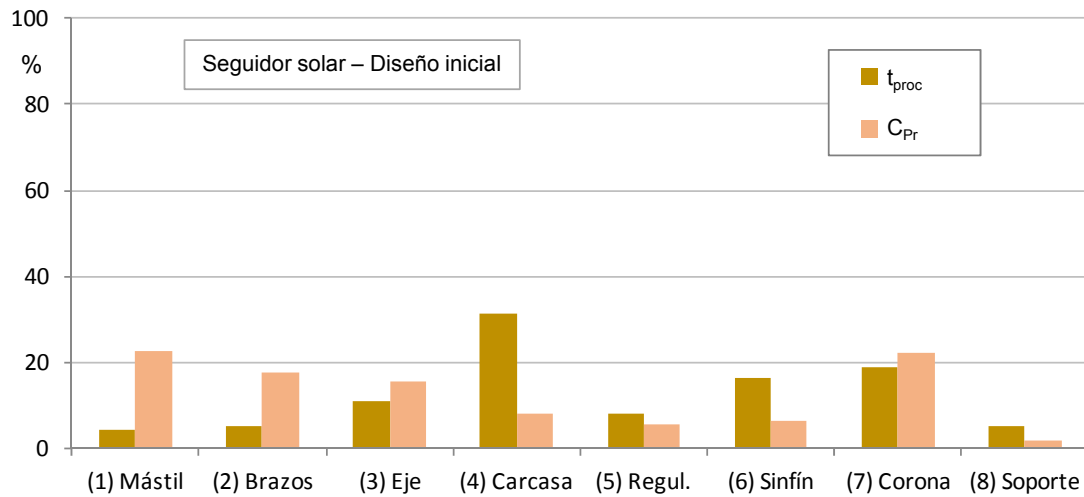


Figura C1.4. Distribución de tiempos de procesado y costes de producción de los componentes del seguidor.

Si se analiza el impacto ambiental, la masa del componente y el material utilizado en su fabricación determinan el valor del impacto. De esta forma, el mástil (1) y el eje (3) realizados en S275JR y con elevada masa, son los componentes que tienen una contribución porcentual más elevada. En cambio, si se analizan tiempos y costes de producción, componentes como la carcasa (4) y la corona (7), con una masa bastante más pequeña, presentan una contribución relativa elevada y tienen, por tanto, un impacto sobre los parámetros socio-económicos muy significativo. En particular, realizar el mecanizado de la carcasa y del sistema sinfín-corona genera elevados costes de mano de obra y de consumibles.

De acuerdo con estos resultados, las estrategias de rediseño se centrarán en la selección de materiales de menor impacto, en la reducción de materiales, tanto en masa como en diversidad, y en la aplicación de procesos de inyección de plástico que permitan reducir tiempos y costes.

Fase 2 - Rediseño de producto

El proceso de rediseño se aborda analizando cada componente individual del seguidor. De acuerdo con las estrategias planteadas, se proponen varias alternativas de rediseño para cada componente del seguidor solar y se analiza cada una de ellas. Los resultados finales se muestran en la Tabla C1.5 donde el diseño inicial se designa como Di y las alternativas de rediseño como Ai. En cada caso, se indica el tipo y tamaño de la materia prima utilizada, la energía consumida durante el proceso de fabricación y la cantidad de material desechado. También se obtiene la masa final del componente en el producto terminado.

Componentes		Materia prima		Proceso		Producto	Análisis de resistencia $\sigma_{\max} < \sigma_y$ (MPa)	EI99 (mPt)
		Material	Tamaño (mm)	E_{comp} (Kw·s)	$M_{\text{MD, comp}}$ (Kg·10 ⁻³)	M_{comp} (Kg)		
(1) Mástil		Di	S275JR g 60x40x5	5,02	15	10,58 (1,5m)	86,1 < 275	3178,5
		A1	AISI 304N 60x30x4	4,93	12	6,25 (1,2m)	99,5 < 330	5260,1
		A2	S275JR g 60x30x4	3,96	11	6,17 (1,2m)	99,5 < 275	1854,3
		A3	Al 6066T4 60x40x5	1,26	5	2,95 (1,2m)	68,9 < 207	177
(2) Brazos		Di	Al 6066T4 60x30x2	2,41	18	1,97 (1,05m)	48,7 < 207	119,8
		A1	AISI 304N 40x30x1.5	11,14	21	3,66 (1,15m)	81,3 < 330	3109,8
		A2	S275JR g 40x30x1.5	9,79	20	3,60 (1,15m)	81,3 < 275	1092
		A3	Al 6066T4 50x30x2	2,28	9	1,92 (1,15m)	61,9 < 207	116
(3) Eje		Di	S275JR g Ø30	10,16	7	6,37 (1,15m)	70,7 < 275	1913,2
		A1	AISI 304N Ø30x4	8,41	2	2,60 (1 m)	96,6 < 330	2185,7
		A2	S275JR g Ø30x4	8,33	2	2,56 (1 m)	96,6 < 275	768,7
		A3	Al 6066T4 Ø30	1,61	2	1,94 (1 m)	70,7 < 207	116,5
(4) Carcasa		Di	PP 4062 Pellet	340,9	18	0,28	12 < 33.8	37,8
		A1	PS 6055 Pellet	313,6	20	0,32	12 < 41.4	42,7
(5) Regul.		Di	AISI 304N t=3	244,2	80	0,94	114 < 330	858,3
		A1	S275JR g t=3	295,4	77	0,91	114 < 275	297,8
		A2	Al 6066T4 t=4,5	62,33	43	0,5	62.2 < 200	32,08
(6) Sinfín		Di	Nylon 66/6 Ø20	32,18	17	0,02	21,4 < 63.5	15,4
		A1	PS 6055 Pellet	4,49	1	0,012	21,4 < 41.4	1,5
		A2	PP 4062 Pellet	5,83	1	0,011	21,4 < 33.8	1,4
(7) Corona		Di	Nylon 66/6 Ø65	20,68	12	0,017	21,4 < 63.5	12,4
		A1	PS 6055 Pellet	6,87	1	0,011	21,4 < 41.4	1,4
		A2	PP 4062 Pellet	7,51	1	0,010	21,4 < 33.8	1,2
(8) Soporte		Di	S275JR t=1	2,60	6	0,025	0,1 < 275	5,3
		A1	Nylon 66/6 t=1	2,42	1	0,004	0,1 < 63.5	5,3
		A2	PS 6055 Pellet	2,59	1	0,004	0,1 < 41.4	1,3
		A3	PP 4062 Pellet	2,97	0,7	0,003	0,1 < 33.8	1,2

Tabla C1.5. Seguidor solar. Alternativas de rediseño.

Se comprueba la resistencia mecánica según las especificaciones del producto (la tensión máxima en cada componente es designada $\sigma_{\text{máx}}$, la tensión límite del material σ_y). En todos los casos, los materiales que se proponen como alternativas son de elevada resistencia a la corrosión. Finalmente, se calcula EI99 para cada alternativa de rediseño. Todos los cálculos relacionados con el proceso de fabricación y el análisis de resistencia se pueden consultar en el Anexo C1.

En el mástil (1), se observa que la alternativa de rediseño que genera menor impacto es la A3, que propone la utilización de perfil de Al 6066T4 con una sección de 60x40x5 mm. Es la opción que proporciona un componente más ligero, ya que el material seleccionado como materia prima tiene menor densidad y la longitud se reduce de 1,5 m a 1,2 m. También genera un consumo menor de energía durante el proceso de fabricación, puesto que el material es de menor dureza y se facilita el mecanizado. No obstante, el tamaño de la sección es superior al de otras alternativas consideradas para cumplir el criterio de resistencia mecánica (el coeficiente de seguridad aplicado es 3). Respecto al diseño inicial, el impacto ambiental disminuye considerablemente, debido, por una parte, a que la masa se reduce y, por otra, a que el material tiene un porcentaje de recuperación en su fase final de vida mucho mayor. En otros componentes metálicos, se comprueba también que la alternativa que propone la utilización de Al 6066T4 es la opción más favorable. En el caso de los brazos (2), la masa final del componente solo varía debido al cambio en las dimensiones del perfil. En los componentes fabricados en plástico, como la carcasa (4), el sinfín (6) y la corona (7), la opción seleccionada es el PP4062. Genera menor impacto ambiental y permite optimizar el consumo de energía y el tiempo de procesamiento utilizando la inyección en lugar del mecanizado como proceso de fabricación. No obstante, será necesario ampliar el número de recursos dedicados a procesos de inyección, planificar el desarrollo de tareas y la asignación de recursos.

Fase 1b - Evaluación de la sostenibilidad (rediseño)

▪ *Inventario de producción*

A partir de las alternativas seleccionadas para cada componente se obtiene un nuevo diseño de producto, del que se evalúa la sostenibilidad. Los datos relacionados con la fabricación del seguidor solar rediseñado se muestran en el esquema del proceso productivo de la Figura C1.6 y se resumen en las siguientes tablas. En la Tablas C1.6 se indica, para cada componente, el tipo de material, tamaño, cantidad y coste de la materia prima empleada; la energía consumida y el material desechado en el proceso de fabricación y, finalmente, la masa de ese componente en el producto terminado. En la Tabla C1.7 se indica, para cada proceso, el tiempo total empleado en la fabricación de una unidad de producto, la energía consumida y el desgaste que experimentan las herramientas en procesos de mecanizado. Notar que se han introducido cambios en el número de recursos utilizados y que para fabricar el producto rediseñado se propone el uso de una sola fresadora (en el diseño inicial eran 2) y de dos máquinas de inyección (antes era 1).

Componente	Materia Prima				Proceso de fabricación		Producto
	Material	Dimensiones (mm)	Cantidad	C _{comp} (€)	E _{comp} (Kw·s)	M _{MD_comp} (Kg·10 ⁻³)	M _{comp} (Kg)
(1) Mástil	Al 6066T4	Perfil hueco 60x40x5	1,2 m	15,12	1,26	5	2,95
(2) Brazos	Al 6066T4	Perfil hueco 50x30x2	1,15 m	8,94	2,28	9	1,92
(3) Eje	Al 6066T4	Barra, Ø30	1 m	9,89	1,61	2	1,94
(4) Carcasa	PP 4062	Pellet	0,279 Kg	0,19	340,9	18	0,28
(5) Regulador	Al 6066T4	Chapa t=4,5	0,046 m ²	0,68	62,33	43	0,5
(6) Sinfin	PP 4062	Pellet	0,012 Kg	0,01	5,83	1	0,011
(7) Corona	PP 4062	Pellet	0,011 Kg	0,01	7,51	1	0,010
(8) Soporte	PP 4062	Pellet	0,0037 Kg	0,003	2,97	0,7	0,003

Tabla C1.6. Seguidor solar - Rediseño. Datos del proceso productivo de cada componente.

Proceso	Máquina	Nº	t _{proc} (s)	E _{proc} (Kw·s)	D _h (Kg·10 ⁻³)
Corte	Sierra de cinta HB280B	1	9	1,4	2,25
Torneado	Torno CNC Proton 560/1500	1	0,49	0,06	0,004
Fresado	Fresadora 350GP	1	254,1	250	1,59
Perforado	Taladro manual GBM 10RE	1	41,8	5,5	0,5
Corte	Cizalladora pendulante KMT 1350	1	3	0,26	-
Plegado	Dobladora hidráulica 120T	1	2	0,001	-
Inyección	Máquina de inyección Spartan	2	600	167,5	-

Tabla C1.7. Seguidor solar - Rediseño. Datos del proceso productivo.

▪ Evaluación de indicadores

A continuación, se evalúan las métricas ingenieriles y los indicadores de sostenibilidad del producto rediseñado. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla C1.8.

El producto final tiene una masa de 8,9 Kg (incluido el embalaje) y un volumen de 0,024 m³. La energía consumida en cada una unidad fabricada es de 424,72 Kw·s y el porcentaje de material desechado es de 0,79%. Los costes de producción son de 91,58 € y la producción es de 7,6 ud/h. Al igual que en el diseño inicial, se considera una producción en serie y una asignación del 100% en los recursos disponibles. La instalación dispone de 8 trabajadores en total y el número de máquinas de cada tipo se detalla en la Tabla C1.8. La planificación de operaciones de fabricación realizada con estos recursos y el cálculo correspondiente de los costes de producción se detalla en el Anexo C1.

Métricas ingenieriles					
M_P (Kg)	V_P (m ³)	E_{Pr} (Kw·s)	%Res	C_{Pr} (€)	Pr (ud/h)
8,9	0,024	424,72	0,79	91,58	7,6
Indicadores de sostenibilidad					
Dimensión medioambiental		Dimensión económica		Dimensión social	
GWP ₁₀₀ (Kg CO ₂ -eq)	EI99 (pt)	VA (€)	EE (€/pt)	T _t (h)	S _h (€/h)
14,01	0,79	25,4	32,2	0,123	93,81

Tabla C1.8. Seguidor solar - Rediseño. Métricas ingenieriles e indicadores de sostenibilidad.

El cálculo de indicadores muestra que la fabricación de cada unidad de producto supone la emisión de 14,01 Kg CO₂-eq y genera un EI99 de 0,79 pt. De acuerdo con unos ingresos/unidad de 117 € se obtiene un valor añadido de 25,4 €. La Eco-eficiencia es de 32,2 €/pt. En cuanto a los indicadores sociales, el tiempo de trabajo promedio empleado en la fabricación de cada unidad de producto es 0,123 h y los salarios de los trabajadores es 93,81 €/h.

Fase 3 - Comparación de diseños

En esta última fase, se comparan el diseño inicial del seguidor solar y el rediseño. En la Figura C1.5 se resumen los cambios introducidos en el producto y en la Figura C1.6 se muestran los cambios generados en el proceso de producción, con las principales entradas y salidas que intervienen en el sistema.

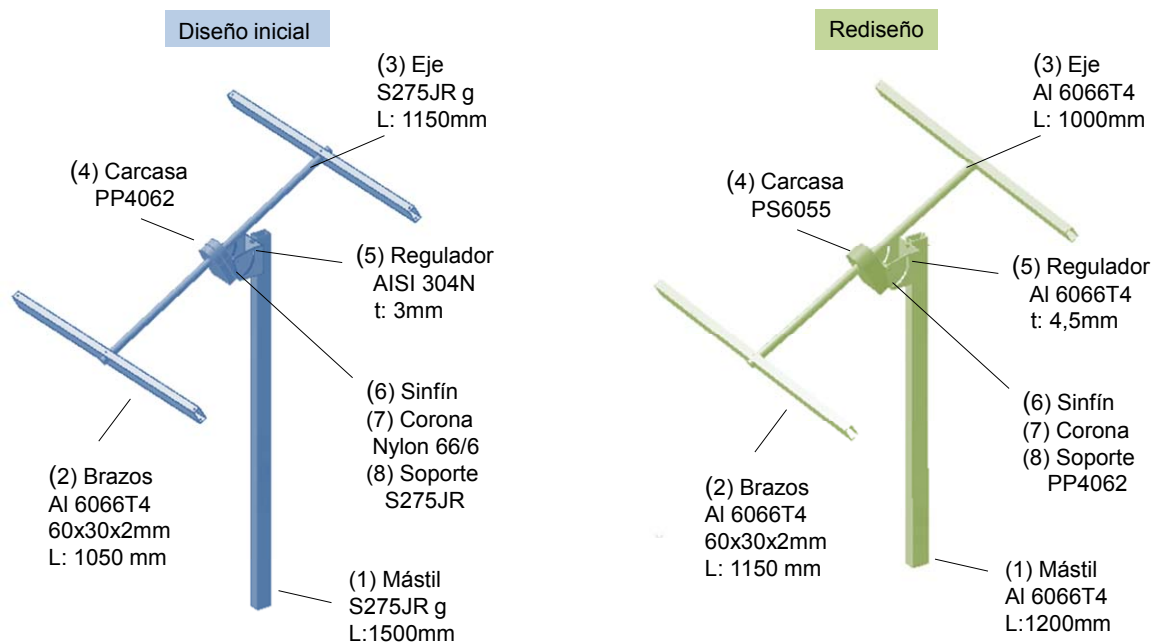


Figura C1.5. Seguidor solar - Principales cambios introducidos en el producto.

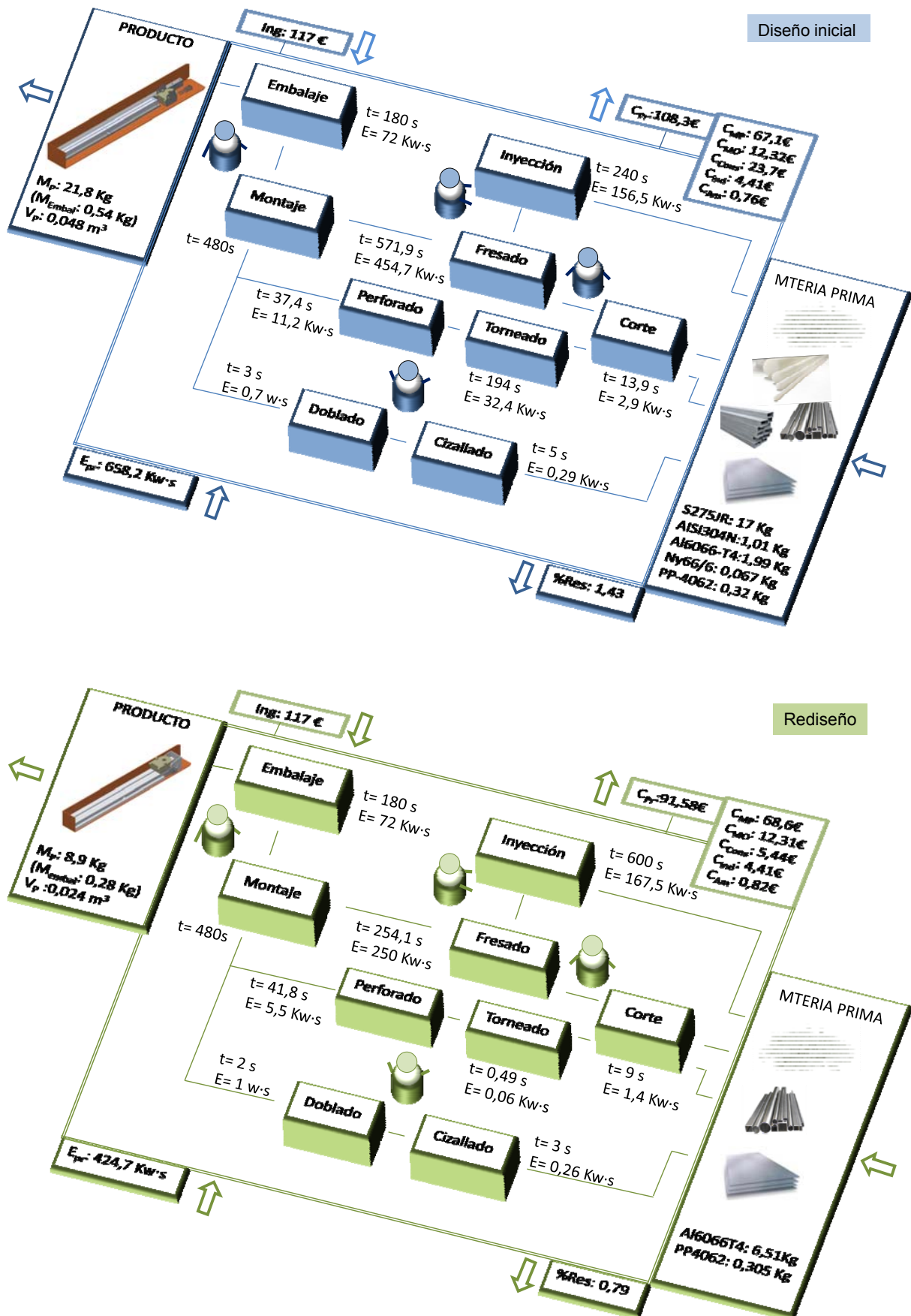


Figura C1.6. Seguidor solar - Esquema de producción y resumen de inventario.

A continuación, se analizan los cambios producidos en la sostenibilidad del producto.

En la parte superior de la Figura C1.7 se comparan las métricas ingenieriles utilizadas en el estudio. Cada uno de los 6 ejes del hexágono corresponde a una de las métricas. La variación se expresa de manera porcentual tomando como referencia el diseño inicial. La masa del producto se reduce casi un 60%, mientras que el volumen de producto se reduce un 50%. La utilización de Al6066T4 y PP4062 en el desarrollo del producto y el cambio introducido en las dimensiones de varios componentes es la causa de este cambio tan significativo. Masa y volumen son también métricas relevantes en la fase de distribución del producto y se podría esperar un efecto positivo sobre los indicadores de esta fase. La cantidad de material desechado se reduce en el rediseño, si bien inicialmente ya era un porcentaje pequeño. La energía consumida en el proceso de fabricación del producto rediseñado se reduce un 35,5%, lo que significa una disminución en el consumo de 233,5 Kw·s por unidad. Los costes de producción se reducen en su conjunto en un 15,5%. Se produce un incremento de 1,5 € en los costes de materia prima y de 0,06 € en los costes de amortización pero una reducción muy notable en el coste asociado a consumos, al reducir los costes en procesos de mecanizado. Finalmente, la planificación de la fabricación en el rediseño permite aumentar un 10% la producción respecto al diseño inicial.

La variación que experimentan los indicadores de sostenibilidad se muestra en los gráficos de la Figura C1.7. El proceso de rediseño permite obtener los siguientes resultados:

- Dimensión ambiental:

La selección adecuada de materiales y la optimización tanto de las dimensiones como de la masa de los componentes del seguidor, permite reducir el impacto ambiental del producto. GWP_{100} disminuye un 38% y EI_{99} disminuye un 88%. Se obtiene un efecto positivo muy destacado en el indicador que agrega diferentes categorías de impacto.

- Dimensión económica:

El valor añadido aumenta en el producto rediseñado 16,7 € debido a la reducción que experimentan los costes de producción. Si bien la materia prima del rediseño tiene un coste ligeramente superior, la fabricación de algunos componentes mediante procesos de inyección, en lugar de mecanizado, permite reducir considerablemente los costes en consumibles. Por otra parte, se contempla la adquisición de una nueva máquina de inyección y se considera su amortización a largo plazo.

Los resultados favorables en la dimensión ambiental y en la económica quedan reflejados en el indicador de eco-eficiencia, que muestra una mejora muy importante.

- Dimensión social:

El tiempo promedio de trabajo empleado en la fabricación de un seguidor se reduce 9,5% debido a una mejora de los tiempos de proceso y a una adecuada planificación de los recursos disponibles. La producción aumenta y el salario/hora de los trabajadores se incrementa un 6,5%.

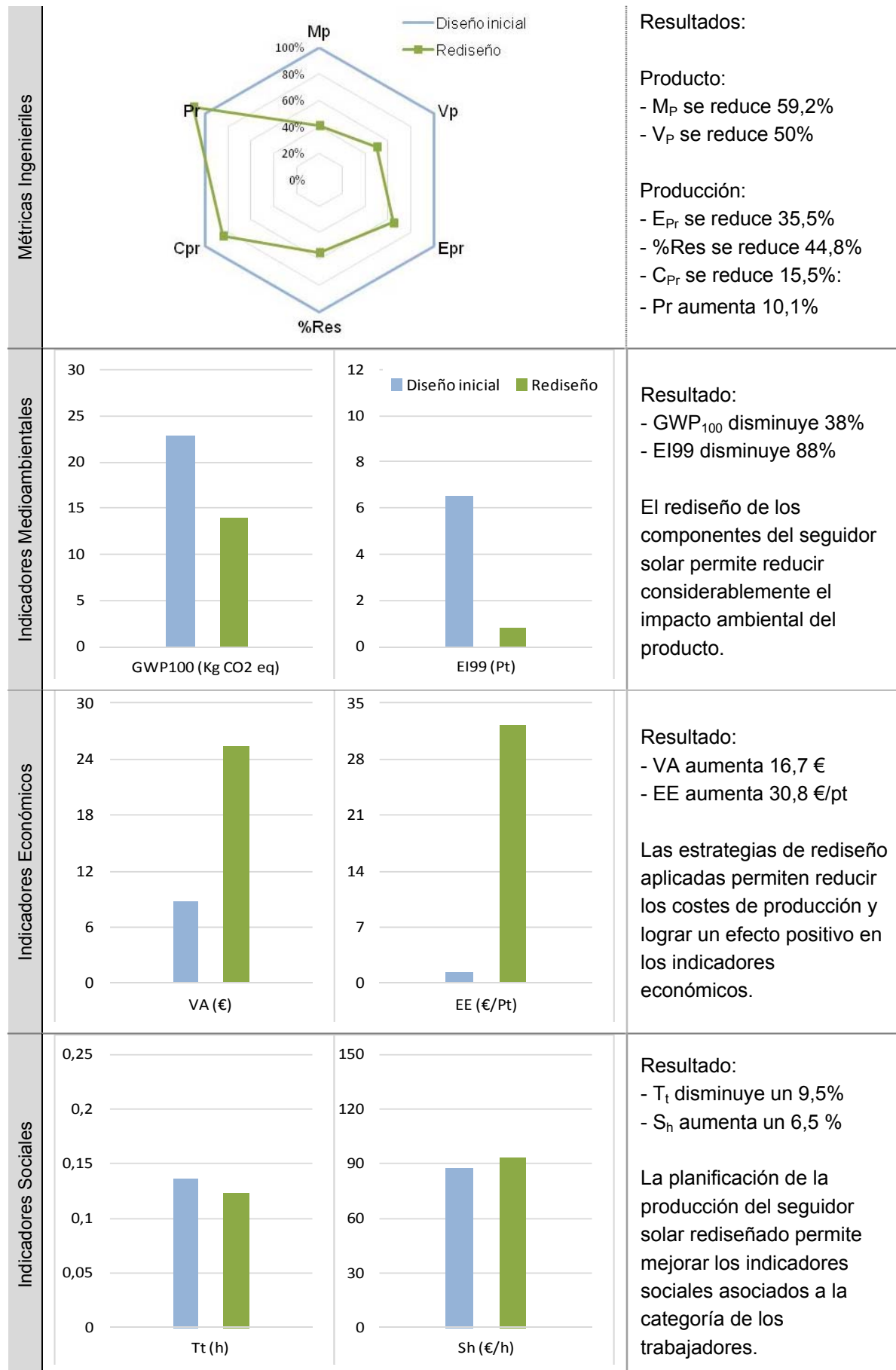


Figura C1.7. Seguidor solar - Comparación de indicadores de sostenibilidad.

Caso 1 - Conclusiones

Este primer caso de estudio permite poner en práctica la metodología de desarrollo de productos sostenibles planteada previamente y examinar la sistemática de aplicación. Los siguientes aspectos se ponen de relieve:

- Evaluar la sostenibilidad del producto requiere su descomposición en partes más simples.
- Realizar el inventario de producción conlleva obtener y organizar convenientemente una cantidad muy amplia y diversa de datos.
- Analizar la sostenibilidad implica conocer cuáles son los factores que influyen sobre ella y cuál es su efecto relativo.
- Plantear estrategias de rediseño sostenible efectivas conlleva la detección de los factores más influyentes.
- Seleccionar una alternativa de rediseño implica comprobar que las especificaciones iniciales del producto se cumplen.

El producto objeto de estudio es un seguidor solar de un eje utilizado en instalaciones de baja potencia. El proceso de rediseño sostenible se centra únicamente en un conjunto de componentes del sistema mecánico. Se parte del proyecto de desarrollo del producto y también se proyecta el rediseño, por tanto, todos los datos que forman parte del inventario de producción se obtienen, principalmente, a partir del conocimiento teórico de los procesos de fabricación.

El proceso de rediseño se aborda analizando cada componente individual del seguidor, ya que el análisis de impactos (ambiental y socio-económico) revela una contribución significativa de cada uno de ellos. Se han aplicado estrategias basadas en la reducción del uso de materiales, tanto en masa (se logra una reducción del 59,2%) como en diversidad (en el nuevo producto se utilizan solo 2 materiales), y en la utilización de materiales con menor impacto ambiental. Además, se propone optimizar los costes de producción de algunas piezas utilizando en su fabricación procesos de inyección en lugar de procesos de mecanizado. Para ello, es necesario adquirir una máquina de inyección adicional y planificar la producción con los cambios introducidos.

En este caso, las estrategias planteadas han permitido obtener significativas mejoras en cada una de las dimensiones de la sostenibilidad:

- Las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas a la fabricación de cada unidad de producto se han reducido casi 9 KgCO₂-eq por producto y el indicador EI99, que agrupa diferentes categorías de impacto, se ha reducido 5,72 pt.
- El resultado económico de la actividad productiva expresada a través del indicador VA es mejorado considerablemente con un incremento de 16,7 €. Además, se logra una mejora de la eco-eficiencia de 30,8 €/pt.
- En la dimensión social, el tiempo de trabajo por unidad experimenta una mejora de 9,5% y el salario/hora de los trabajadores se incrementa un 6,5%.

CASO 2 - CONTENEDOR ISOTERMO

Un contenedor isotermo es utilizado en el almacenamiento y transporte de alimentos frescos y congelados en condiciones óptimas. En su construcción se utilizan materiales con bajo coeficiente de conductividad térmica que aseguran la conservación de la cadena de frío y mantienen todas las cualidades y propiedades de los productos transportados. Dispone de una puerta de acceso que proporciona un cierre hermético y cuenta con una estructura que mantiene intacto el espacio de almacenamiento interno frente a golpes o sobrecargas.

Para adaptarse a las diversas condiciones de transporte, existen contenedores de diferentes dimensiones y capacidades y con varios tipos de accesorios (separadores, bandejas, cajones,...) que permiten modificar la distribución del espacio interior (Figura C2.1). Las dimensiones del contenedor se establecen en función de su uso y teniendo en cuenta el máximo aprovechamiento del volumen en el vehículo de transporte. Los contenedores refrigerados disponen además de una distribución interior que favorece la correcta circulación del flujo de aire que se genera desde un compresor.



Figura C2.1. Tipos de contenedor isotermo.

Características y especificaciones del producto

El contenedor isotermo objeto de estudio tiene una capacidad de 450 litros, forma prismática y puerta vertical (Figura C2.2). Puede ser apilado en varias alturas. Para ello, dispone de unos topes situados en la parte superior entre los que encajan los patines metálicos de otro contenedor. Está formado por cinco subsistemas funcionales: 1) bastidor, 2) pared exterior, 3) pared interior, 4) aislamiento térmico y 5) puerta. El bastidor aporta resistencia y rigidez. La pared exterior permite absorber golpes. La pared interior define el volumen de almacenamiento y queda en contacto con los alimentos. Entre las dos paredes se sitúa el aislamiento térmico que permite mantener la temperatura de los productos almacenados. Finalmente, la puerta delantera proporciona acceso al compartimento interior.

La puerta es abatible, gira respecto a un eje vertical, dispone de un mango central y su cierre queda asegurado mediante un sistema de anclaje situado en la parte superior, el cual consiste en un gatillo que puede girarse manualmente. En la parte inferior, unos patines sirven de apoyo al contenedor pero pueden ser sustituidos por ruedas si el cliente lo solicita.

Especificaciones:

Capacidad: 450 l

Sistema de torre apilable

Temperatura de trabajo: -90°C/+65°C

Dimensiones	Interiores	Exteriores
Largo	600	736
Ancho	800	955

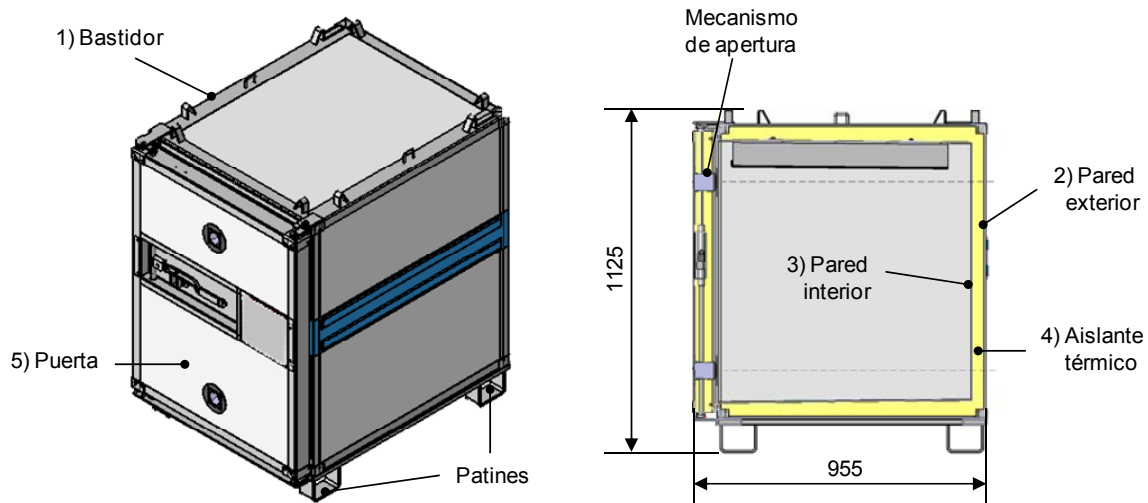


Figura C2.2. Contenedor isotermo - Partes principales, dimensiones y características.

El contenedor tiene unas dimensiones totales exteriores de 736 x 955 x 1125 mm y un coeficiente global de transmisión térmica de 0,4 w/m²K. El rango de temperaturas de trabajo varía entre -90°C y +65°C. Además, en cada subsistema se establecen una serie de especificaciones funcionales que se resumen en la Tabla C2.1.

Subsistema	Especificaciones
1) Bastidor	Resistencia mecánica ≥ 275 MPa
2) Pared exterior	Resistencia al impacto ≥ 8 KJ/m ²
3) Pared interior	Compatibilidad con alimentos
4) Aislante térmico	Coef. de conductividad térmica $\leq 0,03$ Kcal/h·m·K
5) Puerta (guías de cierre)	Dureza ≥ 30 Shore A

Tabla C2.1. Contenedor isotermo. Especificaciones de diseño.

PROCESO DE REDISEÑO SOSTENIBLE

Fase 1a - Evaluación de la sostenibilidad (diseño inicial)

▪ *Inventario de producción*

En esta etapa se recopilan todos los datos que intervienen en la fabricación del contenedor isotermo. El estudio se ha realizado con la colaboración del grupo Tatoma, empresa situada en la Comunidad de Aragón, dedicada a la fabricación de equipamiento industrial. De esta forma, el inventario de producción se ha obtenido a partir de los datos medidos en el propio proceso de fabricación y facilitados por la compañía fabricante.

El contenedor se compone de 80 piezas diferentes (incluyendo elementos comerciales), que se agrupan en 10 subconjuntos, tal y como se detalla en el Anexo C2. La materia prima que se requiere para la fabricación del contenedor se indica en la Tabla C2.2. El bastidor es realizado en acero S275JR y en su fabricación se utilizan chapas de diferentes espesores y barras y tubos de diferentes diámetros. La pared exterior se fabrica con planchas de 2 mm de espesor de poliestireno de alto impacto (HIPS) y la pared interior a partir de un material compuesto formado por una matriz de poliestireno (80%) reforzada con fibra de vidrio (20%), el cual se adquiere como una pieza moldeada por inyección. La espuma de poliuretano (PUR), utilizada como aislante térmico, se obtiene por medio de la reacción química de dos componentes, isocianato y polioli. Se inyecta entre las paredes interior y exterior. Además, entre ambas paredes, se utilizan unos separadores de poliestireno (PS). Finalmente, en la puerta se utiliza caucho en el burlete de cierre y PVC en las guías. Junto al tipo de materia prima, en la Tabla C2.2 se indica la masa, precio y coste final de cada uno de los materiales adquiridos.

Subsistema	Material	Tipo de materia prima	M _{MP_mat} (Kg)	Pr _{MP_mat} (€/Kg)	C _{MP_mat} (€)
1) Bastidor	S275JR g	Chapa, Barra, Tubo	47,84	1,79	85,65
2) Pared exterior	HIPS	Planchas (e= 2 mm)	9,42	1,30	12,25
3) Pared interior	PS (80%) + FV (20%)	Pieza inyectada	9,74	3,64	35,45
4) Aislamiento (aislante térmico)	Isocianato + Polioli	Líquido	7,5 (l)	14,52 (€/l)	108,9
4) Aislamiento (separadores)	PS	Espuma (e= 40 mm)	0,023	1,2	0,03
5) Puerta (burlete de cierre)	Caucho	Perfil extruido	1,56	10	15,6
5) Puerta (guías de cierre)	PVC	Perfil extruido	0,22	1,49	0,33

Tabla C2.2. Contenedor isotermo - Diseño inicial. Datos de la materia prima utilizada.

Las principales operaciones que intervienen en el proceso de fabricación son, por una parte, el corte, conformado y soldado de chapa de acero galvanizado para formar el bastidor, y por otra parte, las operaciones de montaje de las paredes interior y exterior y la inyección entre ambas del aislante térmico. En la Tabla C2.3 se indican el tiempo empleado y la energía que se consume en cada proceso. Notar que la operación de montaje es la que requiere mayor tiempo y el corte con láser la operación que consume más energía. Se indican también los consumos de otros materiales como el de gas inerte en el corte láser. El detalle de las operaciones que intervienen en la fabricación y montaje de cada componente, los tiempos de proceso, consumos de energía y material desechado se pueden consultar en el Anexo C2.

Proceso	Máquina	Nº	t_{proc} (s)	E_{proc} (Kw·s)	Mat _{aux}
Corte	Sierra ABS 320B	1	17,5	7,9	D _n : 7,6 g
Corte láser	Láser Super turbo-x 2412	1	813	3252	V _{gas} : 289 l
Plegado	Dobladora 3 Ejes E-Brake	1	58	0,10	-
Conformado	Prensa Hidráulica BV28E	1	4	60,5	-
Soldadura	Equipo MIG Aromig I200	1	294	1586	V _{gas} : 49,1 l
Inyección	Inyectora PUR LD308	1	910	160	-
Montaje	Remachadora Marson V	2	3600	10	-

Tabla C2.3. Contenedor isotermo - Diseño inicial. Datos del proceso productivo.

Un esquema general del proceso productivo, con las entradas y salidas que intervienen en el sistema se muestra en la Figura C2.6. Se indica la cantidad de cada uno de los materiales utilizados en el proceso de fabricación y la masa y el volumen del producto final. Se muestran los consumos de energía en cada máquina y el consumo global de energía a lo largo del proceso productivo. El inventario de material se completa con la indicación del porcentaje de material desechado. Además, se muestran los principales flujos económicos intercambiados en el proceso de producción. Los costes de fabricación de una unidad de producto se desglosan en cinco bloques. Se puede observar que la materia prima supone la mayor parte del presupuesto de fabricación. Las mediciones de materia prima y el cálculo de los diferentes costes de producción se pueden consultar en el Anexo C2.

▪ Evaluación de indicadores

A partir del inventario de producción se obtienen las métricas ingenieriles y los indicadores de sostenibilidad. Los resultados se muestran en la Tabla C2.4. El contenedor isotermo tiene una masa final de 78,7 Kg y un volumen de 0,76 m³ (el producto se entrega sin embalaje adicional). La energía consumida en cada unidad fabricada se de 5077 Kw·s. La cantidad de material desechado (0,61%) es un porcentaje muy reducido de la materia prima adquirida. Los costes totales de producción son de 293 € y la producción promedio de la planta industrial es de 1,2 unidades/hora.

Se considera una producción en serie y una asignación compartida de algunos recursos ya que la instalación fabrica también otro tipo de equipamiento industrial. En particular, para el desarrollo de este producto la instalación dispone de 3 trabajadores en taller y almacén con una asignación completa (100%) y 2 trabajadores en oficina con una asignación del 20%. Las máquinas y equipos enumerados en la Tabla C2.3 se asignan exclusivamente a la fabricación del contenedor.

Métricas ingenieriles					
M_P (Kg)	V_P (m ³)	E_{Pr} (Kw·s)	%Res	C_{Pr} (€)	Pr (ud/h)
78,7	0,76	5077	0,61	293	1,2
Indicadores de sostenibilidad					
Dimensión medioambiental		Dimensión económica		Dimensión social	
GWP_{100} (Kg CO ₂ -eq)	EI99 (pt)	VA (€)	EE (€/pt)	T_t (h)	S_h (€/h)
120,7	21,7	42	1,93	0,83	29,8

Tabla C2.4. Contenedor isotermo - Diseño inicial. Métricas ingenieriles e indicadores de sostenibilidad.

La evaluación de indicadores muestra que la fabricación de cada contenedor genera la emisión de 120,6 Kg CO₂-eq y un EI99 de 21,7 pt. El cálculo de indicadores ambientales se puede consultar en el Anexo C2. Para unos ingresos/unidad de 335 € se obtiene un valor añadido de 42 € y la Eco-eficiencia es 1,93 €/pt. El tiempo de trabajo promedio empleado en la fabricación de una unidad es 0,83 h y el salario de los trabajadores es 29,8 €/h.

A continuación, se analiza qué efecto tienen en la sostenibilidad del producto cada uno de los materiales que forman parte del contenedor isotermo. Cada uno de estos materiales constituye prácticamente un subsistema del contenedor. En la Figura C2.3 se muestra cómo es la distribución del impacto ambiental entre los materiales utilizados en la fabricación del contenedor. En la Figura C2.4 se muestra la distribución de costes de producción que generan estos materiales y la distribución estimada de tiempos que requiere su procesado (sin considerar tiempos de montaje).

Lo gráficos permiten observar que los materiales con mayor incidencia en la sostenibilidad son S275JR (utilizado en el bastidor) y PUR (utilizado en el aislamiento). En el caso del indicador GWP_{100} , el 35,6% corresponde a S275JR y el 31,4% a PUR, y en el caso del EI99, hasta un 75% del valor obtenido en este indicador es causado por S275JR. Considerando la dimensión económica, el 29,5% de los costes de producción son debidos a S275JR y el 37,5% a PUR. Finalmente, el 55,5% del tiempo de procesado es dedicado a la fabricación del bastidor y el 42% a incorporar el aislamiento térmico en el contenedor. De acuerdo con estos resultados, las estrategias de rediseño se focalizan en la reducción o sustitución de estos materiales.

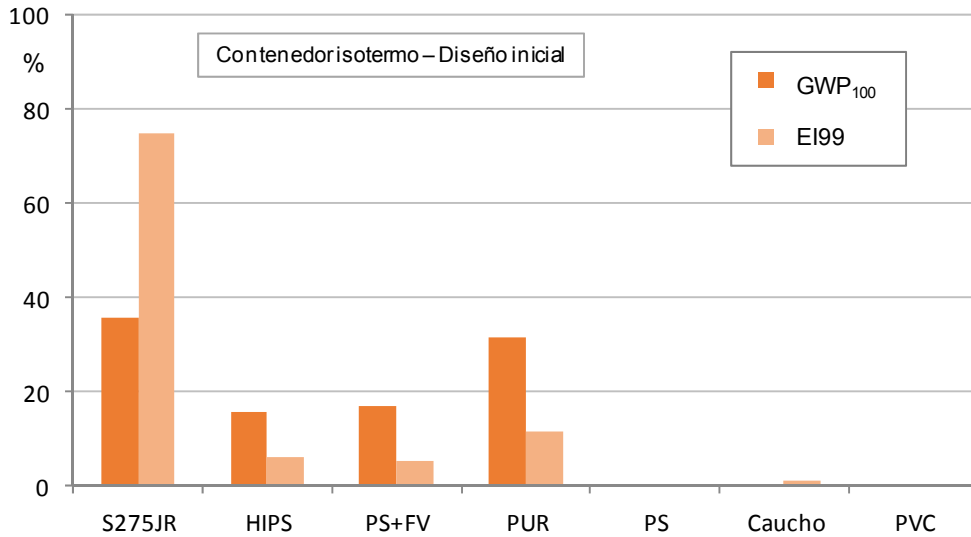


Figura C2.3. Distribución del impacto ambiental de los materiales utilizados.

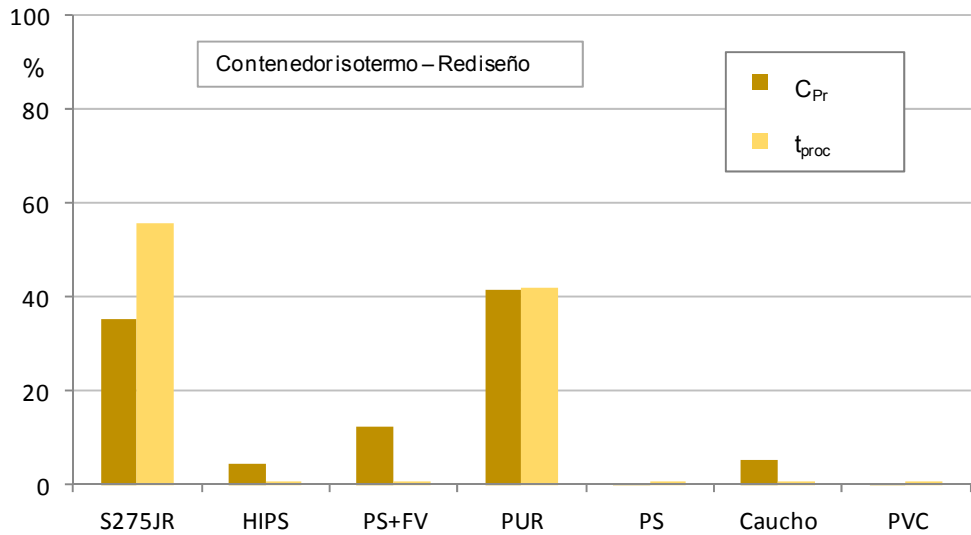


Figura C2.4. Distribución de costes de producción y tiempos de procesado de los materiales utilizados.

Fase 2 - Rediseño de producto

Se proponen dos estrategias principales de rediseño sostenible: 1) reducción de la masa y 2) búsqueda de materiales de menor impacto.

En primer lugar se aborda la optimización de la masa de algunos componentes. En este caso, las especificaciones de resistencia mecánica del bastidor y de capacidad de almacenamiento del contenedor (450 l) condicionan el planteamiento de alternativas como la utilización de otros materiales o la modificación del tamaño de componentes. De acuerdo con estos requisitos, se propone introducir cambios en varias piezas (Tabla C2.5) que forman parte del subsistema bastidor pero no son críticas en su resistencia.

Tal y como se muestra en el Anexo C2, estas piezas se incluyen en el subconjunto 0.3 - bastidor inferior (pieza 26. Chapa bordillo base), subconjunto 0.6 - mango (pieza 63. Chapa mango), subconjunto 0.8 - conjunto eje puerta (pieza 68. Barra calibrada) y subconjunto 0.9 - gatillo (pieza 71. Barra calibrada). En la Tabla C2.5 se resumen los cambios globales que origina el rediseño de estas piezas del bastidor. Se aligera 2,05 Kg y se logra una reducción de 69,7 Kw·s en el consumo de energía durante el proceso de fabricación. El impacto ambiental evaluado a través de EI99, se reduce en 0,67 pt.

Componente	Diseño inicial			Rediseño		
	Formato	E _{comp} (Kw·s)		Formato	E _{comp} (Kw·s)	
26. Chapa bordillo base	Chapa 5 mm	150,2		Chapa 3 mm	108,9	
63. Chapa mango	Chapa 8 mm	98,8		Chapa 6 mm	71,15	
68. Barra calibrada	Barra Ø12	0,07		Tubo Ø12x2	0,02	
71. Barra calibrada	Barra Ø14	0,09		Tubo Ø14x2	0,03	
Subsistema	M _{comp} (Kg)	E _{comp} (Kw·s)	EI99 (pt)	M _{comp} (Kg)	E _{comp} (Kw·s)	EI99 (pt)
1) Bastidor	47,84	4906,9	14,38	45,59	4837,2	13,71

Tabla C2.5. Contenedor isotermo - Rediseño. Reducción de material.

A continuación, y teniendo en cuenta esta mejora en el bastidor, se plantea la utilización de materiales alternativos en cada subsistema del contenedor. Las opciones consideradas y los resultados obtenidos se resumen en la Tabla C2.6. En cada caso, se indica el material y la cantidad de materia prima empleada para fabricar una unidad de producto, el tipo de procesado de la materia prima (en los casos donde se requiera transformación respecto al formato adquirido) y el consumo de energía. Además, se puede comprobar si se cumplen las especificaciones iniciales (indicadas en la Tabla C2.1). El impacto ambiental se evalúa a través del indicador EI99.

Subsistema		Materia prima		Fabricación		Control de especificaciones	EI99 (mPt)
		Material	M _{mat} (Kg)	Proceso	E _{mat} (Kw·s)		
1) Bastidor	D _i	S275JR g	45,59	Conformado	4837,2	275 MPa	13706
	A1	AISI 304N	46,27	Conformado	4843,9	330 MPa	38897
	A2	Al 6066-O	16,85	Conformado	1684,9	207 MPa	1021,3
2) Pared exterior	D _i	HIPS	9,42	Comercial	-	8 KJ/m ²	1130,4
	A1	PP	8,57	Comercial	-	12 KJ/m ²	1028,4
	A2	PPO	9,60	Comercial	-	15 KJ/m ²	1152,1
3) Pared interior	D _i	PS+FV	9,74	Comercial	-	Compatible	1003,2
	A1	PS+FL	8,91	Comercial	-	Compatible	908,3
	A2	LDPE+FL	8,08	Comercial	-	Compatible	824,5
4) Aislante térmico	D _i	PUR	10,21	Inyección	160	0,034 Kcal/h·m·K	2145,3
	A1	Fibra de lino	9,19	Comercial	-	0,033 Kcal/h·m·K	275,7
5) Puerta (guías)	D _i	PVC	0,22	Comercial	-	30 Shore A	22
	A1	Caucho	0,17	Comercial	-	70 Shore A	20,4

Tabla C2.6. Contenedor isotermo - Rediseño. Utilización de otros materiales.

El rediseño del producto se basa en la selección de las alternativas con menor impacto de acuerdo a los resultados obtenidos en la Tabla C2.6. En el bastidor se mantiene el acero S275JR como material de fabricación, ya que el acero inoxidable tiene un impacto ambiental muy superior y la aleación de aluminio no cumple la especificación inicial de resistencia. Una vez aplicada la estrategia de reducción de material, se obtiene una disminución del 5% en el indicador EI99. En la pared exterior se proponen como materiales alternativos polipropileno (PP) y poli-óxido de fenileno (PPO). Ambos cumplen la especificación de resistencia al impacto. Se selecciona el primero puesto que genera un impacto ambiental ligeramente menor. En la pared interior, se consideran como alternativas poliestireno reforzado con fibra de lino (PS+FL) y polietileno de baja densidad con fibra de lino (LPDE+FL). En los dos casos, se cumple la condición de compatibilidad alimentaria. Se selecciona la segunda opción, ya que genera menor impacto ambiental. Como alternativa al PUR utilizado en el aislamiento térmico, se propone emplear fibra de lino. Los dos materiales tienen un coeficiente de conductividad térmica adecuado, pero el impacto ambiental de la fibra de lino es mucho menor (87% de reducción). Además, la fibra de lino se puede adquirir en planchas comerciales con el espesor adecuado y, de esta manera, reducir el consumo de energía asociado a la inyección de PUR. Finalmente, se propone utilizar caucho en lugar de PVC en las guías de la puerta.

Fase 1b - Evaluación de la sostenibilidad (rediseño)

▪ *Inventario de producción*

Los datos relacionados con la fabricación del contenedor isotermo rediseñado se muestran en el esquema del proceso productivo de la Figura C2.6 y se exponen de forma resumida en las siguientes tablas. La Tabla C2.7 muestra el tipo, cantidad y coste de la materia prima empleada. Se puede observar que los costes más elevados siguen asociados a los materiales que constituyen el bastidor y el aislamiento. La Tabla C2.8 muestra el tiempo empleado y la energía consumida en cada uno de los procesos de fabricación de un contenedor. Se observa que los procesos de corte láser y soldadura mantienen consumos de energía elevados.

Subsistema	Material	Tipo de materia prima	M _{MP_mat} (Kg)	Pr _{MP_mat} (€/Kg)	C _{MP_mat} (€)
1) Bastidor	S275JR g	Chapa, Barra, Tubo	45,59	1,79	81,61
2) Pared exterior	PP	Planchas (e= 2 mm)	8,57	1,2	10,28
3) Pared interior	LDPE + FL	Pieza inyectada	8,08	3,4	27,79
4) Aislamiento (aislante térmico)	Fibra de lino	Plancha	9,19	12	110,28
4) Aislamiento (separadores)	PS	Espuma (e= 40 mm)	0,023	1,2	0,03
5) Puerta (burlete de cierre)	Caucho	Perfil extruido	1,73	10	17,3

Tabla C2.7. Contenedor isotermo - Rediseño. Datos de la materia prima utilizada.

Proceso	Máquina	Nº	t_{proc} (s)	E_{proc} (Kw·s)	Mat_{aux}
Corte	Sierra ABS 320B	1	55	9	D_h : 7,5 g
Corte láser	Láser Super turbo-x 2412	1	813	3182	V_{gas} : 283 l
Plegado	Dobladora 3 Ejes E-Brake	1	58	0,10	-
Conformado	Prensa Hidráulica BV28E	1	4	60,5	-
Soldadura	Equipo MIG Aromig I200	1	294	1586	V_{gas} : 49,1 l
Montaje	Remachadora Marson V	2	3600	10	-

Tabla C2.8. Contenedor isotermo - Rediseño. Datos del proceso productivo.

▪ Evaluación de indicadores

Las métricas e indicadores que se obtienen para el producto rediseñado se muestran en la Tabla C2.9. El nuevo contenedor proyectado tiene una masa final de 72,7 Kg y un volumen de 0,76 m³. La masa se reduce y el volumen no se modifica. El consumo de energía en el proceso de producción es 4847,2 Kw·s. Se reduce debido, en parte, al menor consumo que supone la colocación del nuevo aislamiento térmico. El porcentaje de material desechado se mantiene muy bajo (0,62%). En el rediseño, los costes de producción son de 281,5 €. Se reducen debido al menor coste estimado en la adquisición de materia prima. La producción promedio de la planta industrial se eleva a 1,42 ud/hora, ya que se prevé reducir el tiempo de fabricación (el mezclado de componentes y la reacción química completa para generar la espuma de PUR suponía 910 s). Los recursos utilizados y su asignación no han sido modificados respecto al diseño inicial.

Métricas ingenieriles					
M_P (Kg)	V_P (m ³)	E_{Pr} (Kw·s)	%Res	C_{Pr} (€)	Pr (ud/h)
72,7	0,76	4847,2	0,62	281,5	1,42
Indicadores de sostenibilidad					
Dimensión medioambiental		Dimensión económica		Dimensión social	
GWP_{100} (Kg CO ₂ -eq)	EI99 (pt)	VA (€)	EE (€/pt)	T_t (h)	S_h (€/h)
60,8	18,2	53,5	2,93	0,7	35,3

Tabla C2.9. Contenedor isotermo - Rediseño. Métricas ingenieriles e indicadores de sostenibilidad.

En cálculo de indicadores muestra que, en la dimensión medioambiental GWP_{100} y EI99 disminuyen y se obtienen valores de 60,8 Kg CO₂-eq y 18,2 pt; en la dimensión económica, considerando que los ingresos/unidad no cambian, VA y EE aumentan y se obtienen valores de 53,5 € y 2,93 €/pt; y en la dimensión social se estima el tiempo de trabajo promedio empleado en la fabricación de una unidad en 0,7 h y los salarios de los trabajadores en 35,3 €/h, mejorando respecto al diseño inicial.

Fase 3 - Comparación de diseños

En este apartado se muestra la evolución de la sostenibilidad del producto en la etapa de producción. En la Figura C2.5 se indican los cambios introducidos en el contenedor isotermo y en la Figura C2.6 se muestran los cambios globales que se generan en el proceso productivo, incluyendo las entradas y salidas de materiales y los flujos económicos intercambiados.

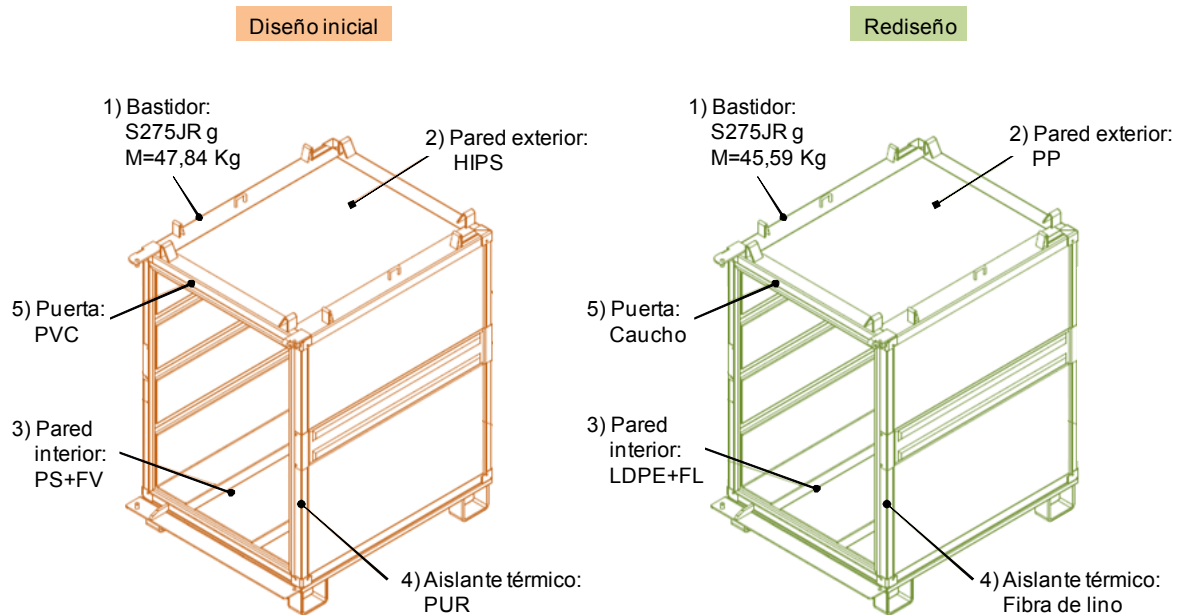


Figura C2.5. Contenedor isotermo - Cambios introducidos en el producto.

A continuación, en la Figura C2.7 se comparan el producto inicial y el rediseñado, utilizando las métricas e indicadores de sostenibilidad obtenidos en el estudio. La variación de métricas se expresa de forma porcentual tomando como referencia el diseño inicial. La optimización de la masa de algunos componentes y la selección de otros materiales permite reducir la masa un 7,5%. El volumen no varía. La aplicación de las estrategias de rediseño permite reducir la energía consumida durante el proceso de fabricación un 4,5% (supone una disminución de 220 Kw·s) y los costes de producción un 3,7% (11,5 €). La fibra de lino tiene un coste más elevado que los componentes del PUR, pero el coste global de la materia prima para constituir el resto de subsistemas del contenedor, es menor. Además, los cambios derivados de la sustitución de PUR por fibra de lino en el aislamiento térmico, suponen una reducción de los tiempos de fabricación y un aumento de la producción en un 7,1%.

El análisis de indicadores muestra que la sostenibilidad del contenedor proyectado en el rediseño mejoraría respecto al inicial. Se estima una reducción del impacto ambiental (GWP_{100} disminuye 50,4% y EI_{99} disminuye 16,3%), un efecto positivo en los indicadores económicos (VA aumenta 11,5 € y EE aumenta 1 €/pt) y una mejora de los indicadores sociales (T_t disminuye un 15,7% y S_h aumenta un 18,4 %).

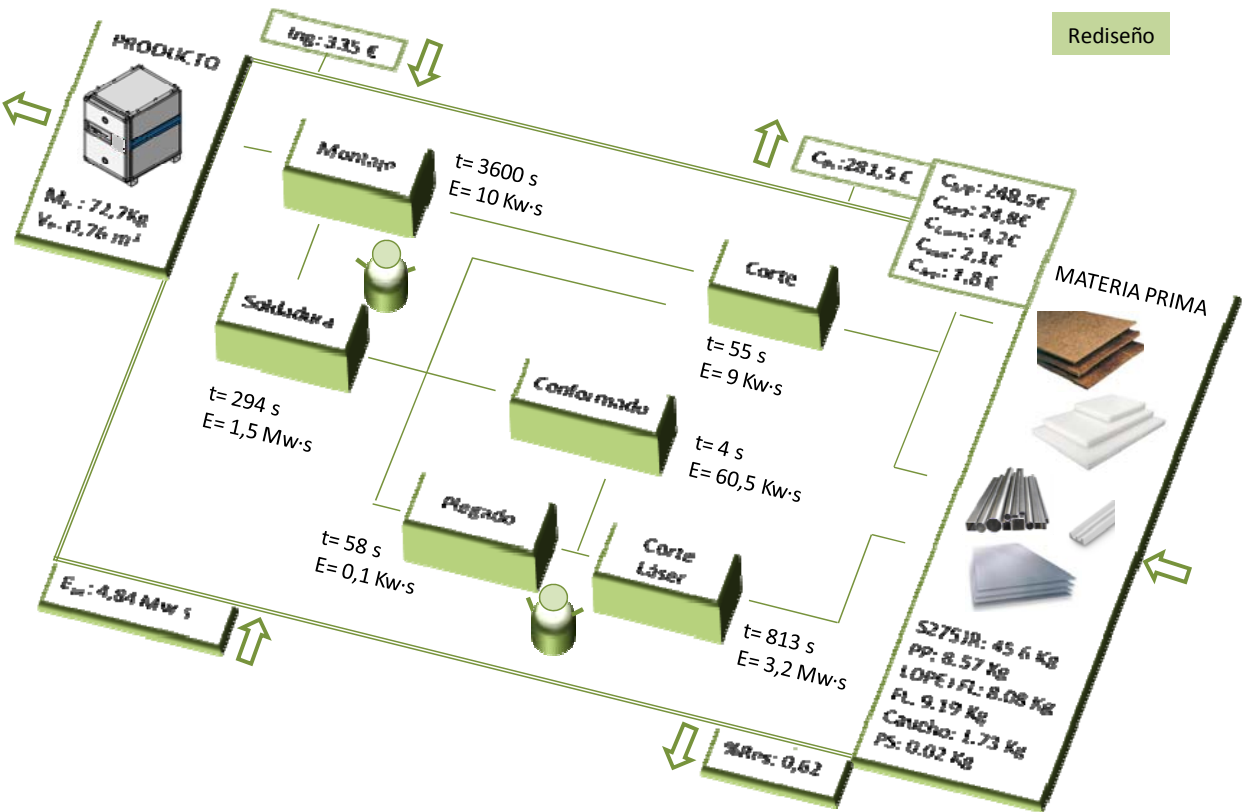
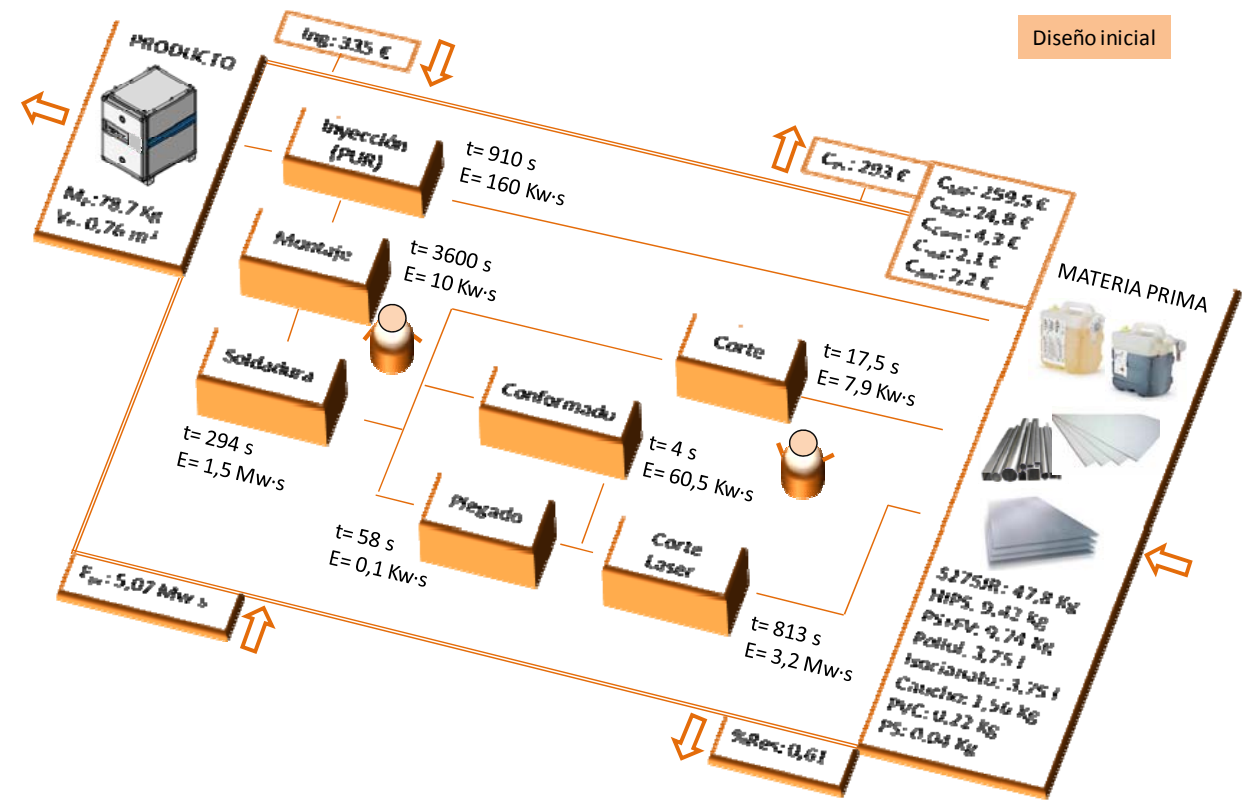


Figura C2.6. Contenedor isotermo - Esquema de producción y resumen de inventario.

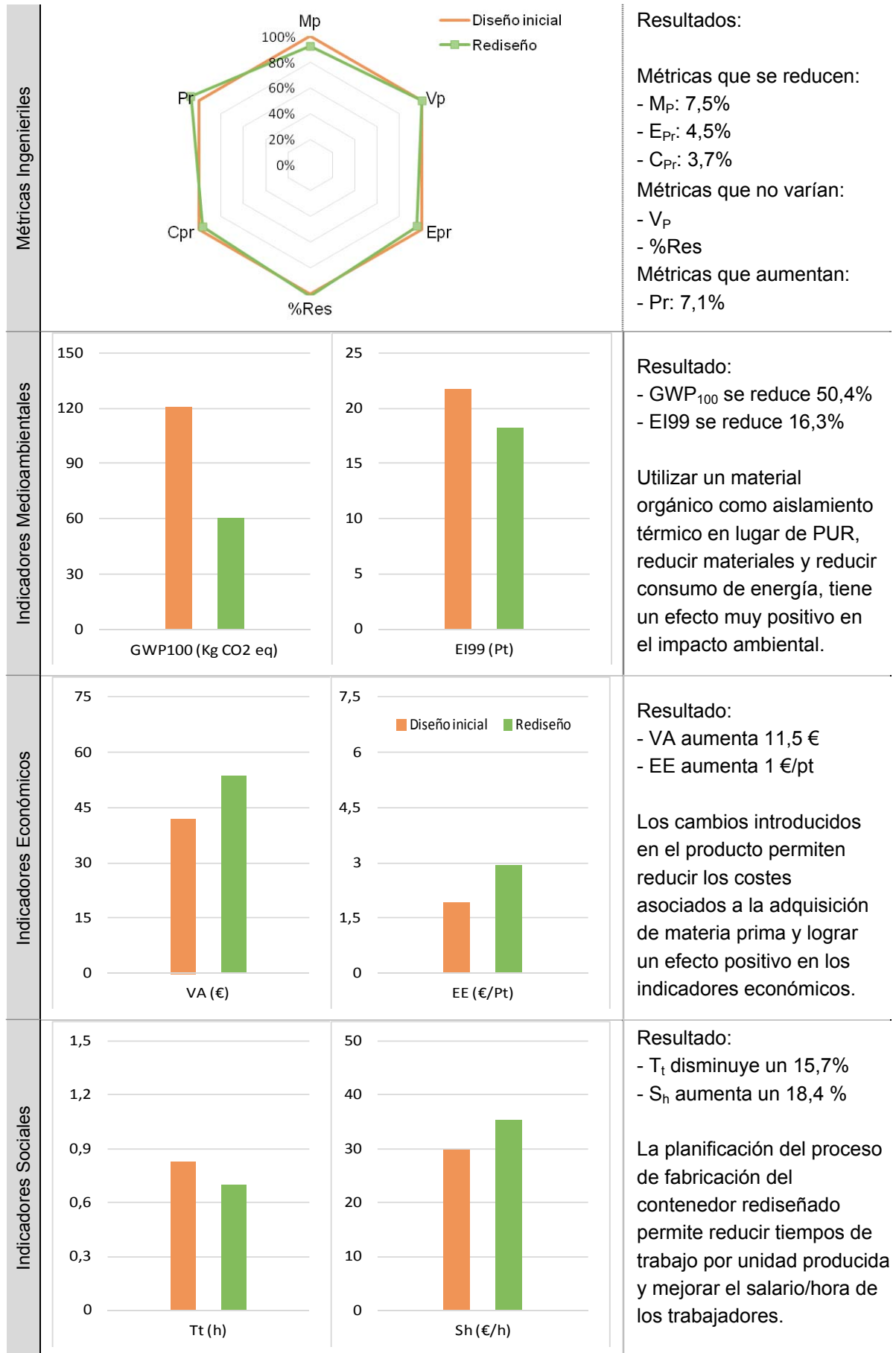


Figura C2.7. Contenedor isotermo - Comparación de indicadores de sostenibilidad.

Caso 2 - Conclusiones

El producto es un contenedor isotermo utilizado para el almacenamiento y transporte de alimentos. El estudio realizado se basa en el desarrollo del producto por parte de una empresa. Se parte de los datos proporcionados directamente por el fabricante y se proyecta su rediseño. A través de la metodología se proyecta un diseño con el que se prevé obtener una mejora de los indicadores de sostenibilidad en la fase de producción. Los resultados obtenidos fueron trasladados a la empresa para que tome las decisiones que considere oportunas.

El proceso de rediseño se aborda analizando los diferentes subsistemas funcionales del contenedor que se caracterizan por los materiales que los constituyen. Se detecta que los materiales con mayor incidencia en la sostenibilidad son S275JR (utilizado en el bastidor) y PUR (utilizado en el aislamiento térmico) y se proponen alternativas de rediseño que cumpliendo las especificaciones de rediseño, permiten mejorar sustancialmente la sostenibilidad del producto.

En este caso, el análisis del producto se realiza considerando los materiales que intervienen en su fabricación. En el caso de estudio anterior (seguidor solar) se realizó considerando cada uno de los componentes del producto. En cada caso, el análisis se adecúa a las características y constitución del producto, con el objetivo de determinar los principales focos de impacto y proponer estrategias de rediseño eficaces.

Tras aplicar la metodología de rediseño sostenible a un segundo caso de estudio, se ponen de relieve los siguientes aspectos:

- La evaluación de la sostenibilidad se ha realizado utilizando el mismo grupo de métricas e indicadores en los dos productos. Esto permite comparar la evolución del método y los resultados finales. No obstante, la selección de métricas e indicadores se podría ampliar o modificar con el objetivo de realizar un análisis y evaluación más completos y que sean adecuados a las particularidades del producto y a las estrategias aplicadas en el rediseño.
- Determinar los factores que tienen mayor incidencia en la sostenibilidad del producto, requiere un análisis diferenciado para cada producto, de acuerdo con características y su constitución.
- La aplicación de las estrategias de sostenibilidad, el planteamiento de alternativas de rediseño y su evaluación, se realiza también a partir del criterio con el que se ha llevado a cabo el análisis. Esto facilita seguir la evolución de los focos de impacto.
- Las diferentes etapas de las que consta la metodología se desarrollan de manera sistemática. Cada etapa depende de los resultados obtenidos en la etapa anterior. No obstante, el ciclo completo puede repetirse sucesivamente hasta lograr un diseño óptimo. La metodología clásica de diseño de producto incide también en regresar de forma iterativa a las primeras fases del proceso de diseño para comprobar especificaciones, redefinir estrategias y plantear conceptos que puedan mejorar el diseño.

CASO 3 - AERÓGRAFO

Un aerógrafo permite aplicar una fina capa de líquido pulverizado sobre una superficie. Es utilizado habitualmente en modelismo, diseño gráfico y decoración para depositar, de manera precisa y uniforme, una capa de pintura sobre un objeto. Existen diferentes técnicas de pulverización de líquidos, pero en este tipo de dispositivos se produce a través de la interacción con una corriente de aire a gran velocidad. Para ello, se requiere una entrada de aire procedente de una línea de presión y un recipiente que contenga el líquido.

En función de la posición del recipiente de líquido, los aerógrafos se denominan de gravedad o de succión. De acuerdo al control que se realiza sobre los fluidos, se denominan de simple o de doble acción. En los aerógrafos de simple acción el gatillo tiene una sola función que es la de permitir la salida de aire, por lo que no se puede modificar la relación entre los flujos máscicos de los dos fluidos. En cambio, en los aerógrafos de doble acción, el gatillo permite controlar de forma independiente el flujo de aire y el de líquido.

Características y especificaciones del producto

Este estudio se centra en un aerógrafo de gravedad y doble acción. La atomización del líquido se produce por interacción con una corriente de aire en una zona muy próxima al orificio de salida (Figura C3.1). El flujo de aire a gran velocidad arrastra el líquido pulverizado y lo proyecta al exterior a través de una pequeña abertura.

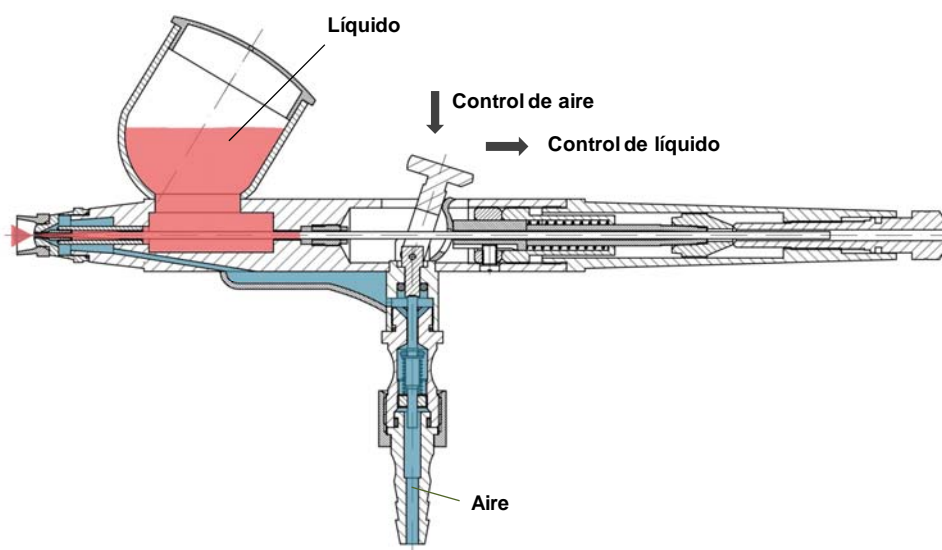


Figura C3.1. Estructura interna de un aerógrafo de gravedad y doble acción.

El suministro de presión se realiza desde un pequeño compresor que se conecta al aerógrafo a través de una manguera. La presión máxima de trabajo es de 3 bar.

En la Figura C3.2 se presenta una vista explosionada del producto. El usuario controla la aplicación de pintura a través de la palanca de acción (9), situada en la parte superior del cuerpo del aerógrafo (29). Realizando presión hacia abajo se regula la entrada de aire y arrastrándola hacia atrás se controla la entrada de líquido. El primer movimiento supone el desplazamiento del émbolo de la válvula (23) que da paso al aire a través del conector de manguera (28). El segundo movimiento permite controlar el movimiento de la aguja (5) y de esta manera regular el paso de líquido desde el depósito. En la zona de salida se encuentran la boquilla (3) que tiene un pequeño orificio de descarga ($\phi=0,2$ mm) y el capuchón de la aguja (1) que presenta una forma especial para conseguir un determinado efecto en la aplicación del producto sobre la superficie. Esta pieza puede ser fácilmente sustituida por otra para obtener un efecto de pulverizado diferente.



Figura C3.2. Aerógrafo - Componentes y características.

La forma de empuñar y manejar el dispositivo puede variar en función del usuario. En todo caso, el diseño está pensado para manipular la palanca de acción con el dedo índice. Para lograr que el dedo tenga una superficie de asiento adecuada y no deslice, la parte superior de la palanca es un disco de 10,5 mm de diámetro y tiene la superficie parcialmente moleteada.

El conjunto está fabricado principalmente en acero inoxidable y lleva un acabado cromado como complemento estético y protector superficial ($e=0,4$ mm). Para lograr un funcionamiento idóneo todos los componentes requieren precisión en formas y dimensiones y materiales de elevada resistencia a la corrosión, ya que se han de manejar pinturas, disolventes y otros productos agresivos. El dispositivo se puede desmontar completamente para realizar operaciones de limpieza y mantenimiento.

PROCESO DE REDISEÑO SOSTENIBLE

Fase 1a - Evaluación de la sostenibilidad (diseño inicial)

▪ *Inventario de producción*

La mayor parte de los componentes del aerógrafo se fabrican en acero inoxidable AISI-304N. Además, se utiliza latón CW614N en algunas piezas que requieren roscados de precisión, EPDM (caucho de baja densidad y elevada resistencia química) en las juntas de estanqueidad y PTFE (teflón) en la fabricación de la arandela de empaque (6). Es una pieza crítica situada entre la aguja y el cuerpo del aerógrafo que impide el paso de pintura y, a la vez, permite el desplazamiento de la aguja. Por otra parte, la aplicación del cromado como tratamiento de acabado superficial requiere la preparación de una solución con iones de cromo.

Gran parte de las operaciones que intervienen en el proceso de fabricación consisten en el mecanizado de barras de diferente diámetro. La secuencia de operaciones necesaria para realizar cada componente, el cálculo del tiempo y de la energía consumida en cada operación, así como la estimación del material desechado, se describen en el Anexo C3. Los planos de conjunto y despiece del dispositivo, así como la secuencia de operaciones de fabricación y cálculo de parámetros asociados pueden ser consultados en el trabajo de **Fuentes (2015)**. El resumen de los datos relacionados con el inventario de producción se muestra en las Tablas C3.1 y C3.2.

En la Tabla C3.1 se indica, para cada uno de los materiales utilizados en la fabricación del aerógrafo, el tipo y cantidad de materia prima que requiere una unidad de producto, la energía consumida y la cantidad de material desechado durante el proceso productivo y, finalmente, la masa de ese material en el producto terminado. Las juntas de EPDM no requieren procesamiento adicional. El aerógrafo se comercializa en un estuche de PVC, que se adquiere a un proveedor externo. La Tabla C3.2 muestra, para cada una de las operaciones del proceso productivo, los equipos utilizados, el tiempo total empleado en la fabricación de una unidad, la energía consumida y el desgaste que experimentan las herramientas en operaciones de mecanizado.

Material	Materia Prima		Proceso de fabricación		Producto
	M_{MP_mat} (Kg·10 ⁻³)	Tipo	E_{mat} (Kw·s)	M_{MD_mat} (Kg·10 ⁻³)	M_{mat} (Kg·10 ⁻³)
AISI 304N	361	Chapa, Barra	114,96	204	157
CW614N	10,1	Barra	2,32	6	4,1
PTFE	0,07	Barra	0,11	0,046	0,023
EPDM	0,075	Comercial	-	-	0,075
Cromo	22,4	Ácido crómico	270	15	7,4

Tabla C3.1. Aerógrafo - Diseño inicial. Materiales utilizados en la fabricación.

Proceso	Máquina	Nº	t_{proc} (s)	E_{proc} (Kw·s)	D_h (Kg·10 ⁻³)
Cizallado	Cizalla hidráulica QC12Y	1	5	0,94	-
Conformado	Prensa Hellen Y32-100	1	9	2,09	-
Mecanizado	Sierra de cinta Masko BZH	1	5,2	0,86	3,37
Mecanizado	Torno CNC Haas ST-10	1	157,8	3,83	0,97
Mecanizado	Torno CNC Haas DS-30	1	649,3	42,89	5,98
Mecanizado	Torno CNC Haas DS-30Y	1	911,6	56,65	4,39
Mecanizado	CNC 3 ejes/vertical VF-1 Haas	1	184,7	8,82	1,01
Soldadura	Equipo TIG DC 400-S	1	110	121,9	V_{gas} : 2,02l
Acabado	Rectificadora - Malcus AR48	1	30	0,25	-
Acabado	Baño electrolítico/cromado	1	216	270	-

Tabla C3.2. Aerógrafo - Diseño inicial. Datos del proceso productivo.

Las operaciones de mecanizado y acabado suponen la mayor parte del consumo de recursos. Un esquema del proceso productivo, con los principales flujos intercambiados en el sistema, se muestra en la Figura C3.6. Se indica la entrada de materia prima y el porcentaje de material desechado, los tiempos y consumos de energía durante el proceso de fabricación y el flujo económico. En el Anexo C3 se detalla el cálculo de los costes de producción.

▪ Evaluación de indicadores

A partir del inventario de producción, se evalúan las métricas e indicadores de sostenibilidad. Los resultados se muestran en la Tabla C3.3. El aerógrafo tiene una masa de 168,5 g y todo el conjunto, que incluye diversos accesorios y el estuche con el que se comercializa, tiene una masa de 520 g (las dimensiones finales del producto son 300x200x70 mm). En este caso, la cantidad de material desechado (57,1%) es un porcentaje muy elevado de la materia prima adquirida inicialmente, debido principalmente a que los procesos de mecanizado generan una gran cantidad de viruta.

Métricas ingenieriles					
$M_{\text{Aerógrafo}}$ (g)	M_{Conjunto} (g)	E_{Pr} (Kw·s)	%Res	C_{Pr} (€)	Pr (ud/h)
168,5	520	513,2	57,1	61,2	6,25
Indicadores de sostenibilidad					
Dimensión medioambiental		Dimensión económica		Dimensión social	
GWP_{100} (Kg CO ₂ -eq)	EI99 (pt)	VA (€)	EE (€/pt)	T_t (h)	S_h (€/h)
1,68	465,1	8,8	0,018	0,13	159,1

Tabla C3.3. Aerógrafo - Diseño inicial. Métricas ingenieriles e indicadores de sostenibilidad.

El consumo de energía para fabricar una unidad de producto es de 513,2 Kw·s. Los costes estimados de producción son 61,2 € y de acuerdo a los recursos disponibles y a los tiempos de proceso, la producción promedio de la instalación es de 6,25 ud/h. Se ha considerado una producción en serie y una asignación del 100% en los recursos disponibles. La instalación dispone de 11 trabajadores en total y el número de máquinas de cada tipo se detalla en la Tabla C3.2. La planificación de operaciones de fabricación se detalla en el Anexo C3. El cálculo de indicadores muestra que la fabricación de cada unidad de producto supone la emisión de 1,68 Kg CO₂-eq y genera un EI99 de 465,1 pt. En la dimensión económica y de acuerdo con unos ingresos por unidad de 70 €, el indicador de valor añadido es 8,8 € y la eco-eficiencia es 0,018 €/pt. Finalmente, en la dimensión social, el tiempo de trabajo promedio empleado en la fabricación de una unidad es 0,13 h y el salario de los trabajadores 159,1 €/h.

A continuación, se analiza el efecto de diferentes factores sobre la sostenibilidad del producto. Se ha optado por mostrar este efecto en dos gráficos diferentes. En la Figura C3.3 se muestra la distribución del impacto ambiental (indicador GWP₁₀₀) y de los costes de producción entre los materiales que forman parte del producto. Y además, se expresa considerando en cada caso, tres factores del proceso de fabricación: la materia prima, la mano de obra y los consumos asociados al proceso. En la Figura C3.4 se muestra la contribución relativa de varios factores al impacto ambiental y a los costes de producción. Los factores considerados son: material que constituye el aerógrafo sin incluir el proceso de cromado, material de acabado, material que constituye el estuche, material desechado y consumos durante el proceso de fabricación.

En el gráfico de la Figura C3.3 observamos que los materiales con un mayor impacto ambiental son AISI 304N y Cromo. En el gráfico de la Figura C3.4 observamos que gran parte de su impacto se debe al material desechado durante el proceso de fabricación. El proceso de cromado contribuye de forma muy importante al impacto ambiental (37%) y supone además, un riesgo elevado para la salud de los trabajadores, por inhalación o por exposición dérmica, debido a la concentración de cromo hexavalente en el aire. En la Figura C3.3 observamos que la mayor parte de los costes de producción son debidos a la mano de obra y a los consumos asociados al procesado del AISI 304N. En la Figura C3.4 se observa que los costes asociados a material desechado y consumos son predominantes. Los costes de mano de obra no aparecen expresados explícitamente. Otros factores como el material utilizado en el producto final o el material utilizado en el estuche tienen contribuciones significativas y son susceptibles de ser mejorados.

Teniendo en cuenta estos resultados se plantea un proceso rediseño de producto formado dos ciclos sucesivos. En cada ciclo, se proponen una serie de estrategias que tienen como objetivo mejorar los indicadores de sostenibilidad del diseño previo. En el primer ciclo, las estrategias se centran en la reducción de la cantidad de material desechado y en la sustitución del cromado por otro proceso de acabado. En el segundo ciclo, se propone utilizar materiales con menor impacto ambiental, tanto en el aerógrafo como en el estuche.

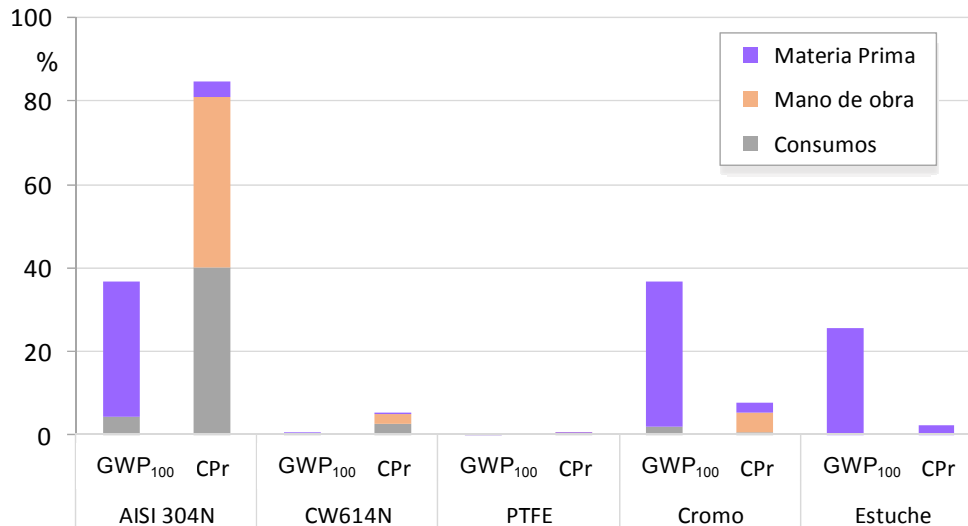


Figura C3.3. Contribución de los materiales a la sostenibilidad del producto.

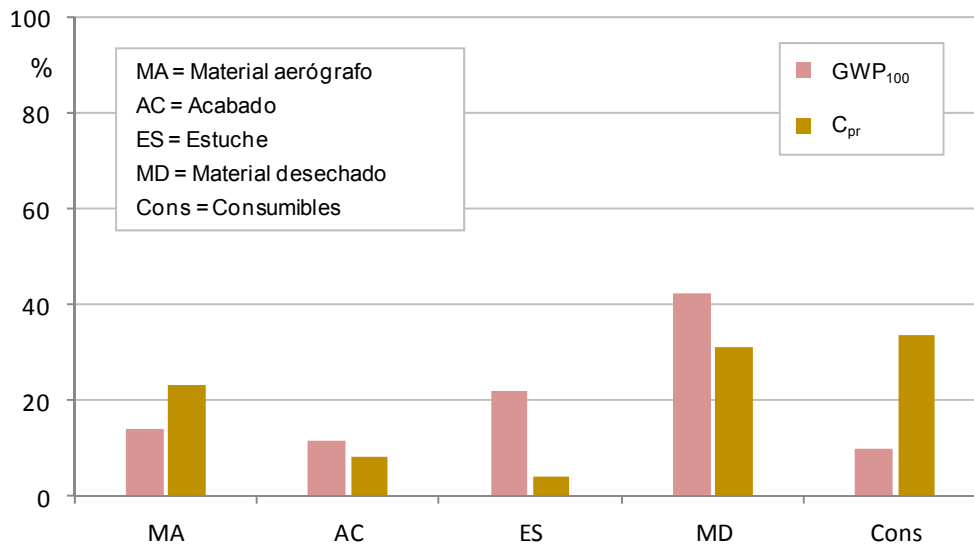


Figura C3.4. Contribución de diversos factores a la sostenibilidad del producto.

Fase 2a - Rediseño de producto (ciclo 1)

Para reducir la elevada cantidad de viruta que se genera durante los procesos de mecanizado, se propone mejorar la selección de materia prima utilizada en la fabricación de algunos componentes. En particular, se propone utilizar materia prima en formato tubular y barras calibradas de menor diámetro. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla C3.4. El diseño inicial se designa D_i y el rediseño R1 (ciclo 1 de rediseño). En cada caso, se indican las dimensiones de la materia prima, las operaciones de mecanizado que pueden ser suprimidas en el rediseño, la energía consumida y el material desechado en el proceso de fabricación.

Analizando el componente 1 (capuchón), se observa que la utilización de materia prima tubular con 7 mm de diámetro y 1,5 mm de espesor permitiría suprimir dos operaciones de mecanizado: un torneado (0,5 mm de profundidad) y un taladrado (4 mm de diámetro). En consecuencia, se podría lograr una reducción del consumo de energía y de la cantidad de viruta generada durante la realización de esta pieza de acuerdo a los valores que se detallan. Igualmente, también se obtiene una mejora relativa de estos parámetros de proceso en otros componentes del aerógrafo.

Componente		Materia prima (mm)	Operaciones de mecanizado suprimidas (mm)	E _{comp} (Kw·s)	M _{MD_comp} (Kg·10 ⁻³)
1. Capuchón AISI 304	Di	Ø8		0,99	1,72
	R1	Ø7 x 1,5	Torneado (0,5), Taladrado (Ø4)	0,62	0,54
2. Cuerpo-boquilla AISI 304	Di	Ø10		2,52	5,15
	R1	Ø9	Cilindrado (0,5)	2,09	3,99
6. Arandela-empaque PTFE	Di	Ø4		0,10	0,05
	R1	Ø3	Cilindrado (0,5)	0,01	0,02
8. Tapa del depósito	Di	Ø28		11,69	30,3
	R1	Ø27	Cilindrado (0,5)	10,69	27,5
9. Palanca AISI 304	Di	Ø12		19,07	15,8
	R1	Ø11	Cilindrado (0,5)	17,82	13,3
11. Tope-camisa-ajuste CW614N	Di	Ø10		0,66	2,36
	R1	Ø10x2,5	Taladrado (Ø5)	0,51	1,41
12. Eje-muelle AISI 304	Di	Ø5,5		2,37	4,64
	R1	Ø5	Cilindrado (0,25)	1,75	3,29
14. Camisa-ajuste AISI 304	Di	Ø10		1,67	4,07
	R1	Ø10x4	Taladrado (Ø2,8), Escariado (0,8)	1,42	3,45
16. Mango AISI 304	Di	Ø13		21,59	44,8
	R1	Ø12x4	Cilindrado (0,5) Taladrado (Ø4,7), Escariado (0,8)	16,05	29,1
17. Tornillo-ajuste AISI 304	Di	Ø9		5,88	13,4
	R1	Ø8	Cilindrado (0,5)	4,39	9,43
21. Cuerpo-válvula AISI 304	Di	Ø11		5,09	11,36
	R1	Ø10	Cilindrado (0,5)	3,93	7,99
26. Tuerca-conector AISI 304	Di	Ø11		2,77	5,72
	R1	Ø11x2	Taladrado (Ø7), Escariado (0,1)	1,41	2,46
29. Cuerpo-aerógrafo AISI 304	Di	Ø13		28,51	48,9
	R1	Ø12	Cilindrado (0,5)	23,29	36,1

Tabla C3.4. Aerógrafo - Ciclo 1 de rediseño. Reducción del material desechado.

Por otra parte, se propone suprimir el proceso de cromado y dejar las superficies exteriores del aerógrafo con un acabado pulido. Las especificaciones funcionales del producto no se ven alteradas, ya que el acero inoxidable tiene excelentes propiedades mecánicas y de resistencia frente a la corrosión. Las operaciones que intervienen en el proceso de pulido son: afinado con amoladora angular y disco aglomerado compacto; preparación para el brillo con amoladora angular y disco de aglomerado con grano fino; pulido con rodillo expansor y pasta de pulido. Se generan varios cambios en los tiempos y consumos de energía que son recogidos en el inventario de producción.

Fase 1b - Evaluación de la sostenibilidad (ciclo 1)

▪ *Inventario de producción*

Los cambios generados en el proceso de producción del aerógrafo rediseñado se muestran en el esquema de la Figura C3.6 y se resumen en las siguientes tablas. En la Tablas C3.5 se indica, para cada uno de los materiales utilizados, el tipo y cantidad de materia prima que se necesita para fabricar una unidad, la energía consumida, el material desechado y la masa final de ese material en el producto terminado. En la Tabla C3.6 se indica, para cada una de las operaciones del proceso productivo, el tiempo total empleado en la fabricación de una unidad de producto, la energía consumida y el desgaste de herramientas. Se puede observar que los tiempos de proceso y los consumos de energía en operaciones de mecanizado disminuyen respecto al diseño inicial. En el proceso de acabado, se mantiene el rectificado de algunas piezas como la aguja (5), desaparece el cromado y se incluyen las operaciones de pulido de las superficies exteriores. El tiempo de este proceso se incrementa respecto al de cromado pero la energía consumida se reduce notablemente.

Material	Materia Prima		Proceso de fabricación		Producto
	M_{MP_mat} (Kg·10 ⁻³)	Tipo	E_{mat} (Kw·s)	M_{MD_mat} (Kg·10 ⁻³)	M_{mat} (Kg·10 ⁻³)
AISI 304N	315,9	Chapa, Barra, Tubo	98,9	158,9	157
CW614N	8,5	Barra	1,28	4,4	4,1
PTFE	0,038	Barra	0,06	0,015	0,023
EPDM	0,075	Comercial	-	-	0,075
Cromo	-	-	-	-	-

Tabla C3.5. Aerógrafo - Ciclo 1 de rediseño. Materiales utilizados en la fabricación.

Proceso	Máquina	Nº	t_{proc} (s)	E_{proc} (Kw·s)	D_h (Kg·10 ⁻³)
Cizallado	Cizalla hidráulica QC12Y	1	5	0,94	-
Conformado	Prensa Hellen Y32-100	1	9	2,09	-
Mecanizado	Sierra de cinta Masko BZH	1	3,93	0,70	0,99
Mecanizado	Torno CNC Haas ST-10	1	143,1	2,99	0,89
Mecanizado	Torno CNC Haas DS-30	1	550,8	37,94	5,12
Mecanizado	Torno CNC Haas DS-30Y	1	784,9	48,62	3,51
Mecanizado	CNC 3 ejes/vertical VF-1 Haas	1	168,1	7,19	0,86
Soldadura	Equipo TIG DC 400-S	1	110	121,9	2,02 I_{gas}
Acabado	Rectificadora Malcus AR48	1	30	0,25	-
Acabado	Amoladora angular industrial LSV39	1	375	29,4	-

Tabla C3.6. Aerógrafo - Ciclo 1 de rediseño. Datos del proceso productivo.

▪ Evaluación de indicadores

A continuación, se obtienen las métricas y los indicadores de sostenibilidad del ciclo 1 de rediseño. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla C3.7. Se suprime el cromado y de esta manera se reduce en 7,4 g la masa que aporta esta capa superficial al producto y al conjunto. A pesar de que ha sido optimizada la selección de materia prima, esta optimización ha sido aplicada solo en la fabricación de algunas piezas, por lo que el porcentaje de material desechado sigue siendo elevado (49,6%). El consumo de energía para fabricar una unidad de producto se reduce hasta 251,9 Kw·s. También se estiman unos costes totales de producción menores (58 €) debido a la reducción de costes de materia prima y consumos (a pesar de que C_{MO} aumentan). Finalmente, se obtiene un aumento de la producción hasta 7 ud/h. Para ello se considera la opción de incorporar un trabajador más en las actividades de taller. La planificación de operaciones de fabricación, así como el cálculo de costes de producción, se detallan en el Anexo C3.

Métricas ingenieriles					
$M_{Aerógrafo}$ (g)	$M_{Conjunto}$ (g)	E_{Pr} (Kw·s)	%Res	C_{Pr} (€)	Pr (ud/h)
161,1	512,6	251,9	49,6	58	7
Indicadores de sostenibilidad					
Dimensión medioambiental		Dimensión económica		Dimensión social	
GWP_{100} (Kg CO ₂ -eq)	EI99 (pt)	VA (€)	EE (€/pt)	T_t (h)	S_h (€/h)
0,93	396	12	0,03	0,118	194,1

Tabla C3.7. Aerógrafo - Ciclo 1 de rediseño. Métricas ingenieriles e indicadores de sostenibilidad.

Los indicadores ambientales son, respectivamente, 0,93 Kg CO₂-eq y 396 pt. Considerando unos ingresos/unidad de 70 €, se obtiene un valor añadido de 12 € y la Eco-eficiencia es 0,03 €/pt. El tiempo de trabajo promedio empleado en la fabricación de una unidad de producto es 0,118 h y los salarios de los trabajadores se elevan hasta 194,1 €/h. Puesto que se ha introducido un operario más, se incrementa notablemente este indicador.

Fase 2b - Rediseño de producto (ciclo 2)

En este segundo ciclo se propone como estrategia de rediseño la utilización de otros materiales en la elaboración del aerógrafo y del estuche que lo contiene. En particular, se propone Al 6066-O como alternativa al AISI-304 y CW614N en el aerógrafo y madera como alternativa al PVC y PUR en el estuche. El funcionamiento del dispositivo y las especificaciones que fueron indicadas inicialmente no se ven comprometidas. En particular, el Al6066-O ($\sigma_y=207$ MPa) soporta adecuadamente las tensiones mecánicas generadas por la presión máxima de trabajo (3 bar) que no superan los 5 MPa en el cuerpo de la válvula (Anexo C3).

Los resultados esperados al aplicar esta propuesta se muestran en la Tabla C3.8. Se enumeran los componentes que ya fueron analizados previamente en el ciclo 1. En cada caso, el diseño de partida es el obtenido en R1 y el rediseño que corresponde a este ciclo es R2. Se indica la energía consumida en la elaboración, el material desechado y el impacto ambiental con EI99. Se observa que el mecanizado de Al 6066-O consume menos energía y genera menor masa de viruta. Además, en cada caso la utilización de los nuevos materiales permite reducir el impacto ambiental.

Componente		Material	E _{comp} (Kw·s)	M _{MD_comp} (g)	EI99 (mPt)
1. Capuchón (Ø7 x 1,5)	R1	AISI 304	0,62	0,54	0,46
	R2	Al 6066-O	0,59	0,19	0,015
2. Cuerpo-boquilla (Ø9)	R1	AISI 304	2,09	3,99	3,36
	R2	Al 6066-O	0,66	1,38	0,09
8. Tapa del depósito	R1	AISI 304	10,69	27,5	23,2
	R2	Al 6066-O	1,89	9,54	0,59
9. Palanca (Ø11)	R1	AISI 304	17,82	13,3	11,4
	R2	Al 6066-O	7,36	4,6	0,322
11. Tope-camisa-ajuste (Ø10x2,5)	R1	CW614N	0,51	1,41	1,19
	R2	Al 6066-O	0,35	0,45	0,03
12. Eje-muelle (Ø5)	R1	AISI 304	1,75	3,29	2,77
	R2	Al 6066-O	0,35	1,14	0,07
14. Camisa-ajuste (Ø10x4)	R1	AISI 304	1,42	3,45	2,91
	R2	Al 6066-O	0,49	1,19	0,07
16. Mango (Ø12x4)	R1	AISI 304	16,65	29,1	24,6
	R2	Al 6066-O	3,15	10,04	0,62
17. Tornillo-ajuste (Ø8)	R1	AISI 304	4,39	9,43	7,95
	R2	Al 6066-O	1,09	3,26	0,21
21. Cuerpo-válvula (Ø10)	R1	AISI 304	3,93	7,99	6,74
	R2	Al 6066-O	1,03	2,76	0,17
23. Tornillo de fijación	R1	CW614N	0,27	0,26	0,22
	R2	Al 6066-O	0,24	0,08	0,007
26. Tuerca-conector (Ø11x2)	R1	AISI 304	1,41	2,46	2,08
	R2	Al 6066-O	0,54	0,85	0,05
29. Cuerpo-aerógrafo (Ø12)	R1	AISI 304	23,29	36,1	30,47
	R2	Al 6066-O	4,28	12,4	0,77
Estuche	R1	PVC - PUR			18,6
	R2	Madera			6,75

Tabla C3.8. Aerógrafo - Ciclo 2 de rediseño. Cambio en los materiales.

Fase 1c - Evaluación de la sostenibilidad (ciclo 2)

▪ *Inventario de producción*

Los nuevos cambios que se generan en la fabricación del aerógrafo (ciclo 2 de rediseño) se muestran en el esquema del proceso productivo de la Figura C3.6 y se resumen a continuación. En la Tabla C3.9 se indica, para cada uno de los materiales utilizados (sin incluir el estuche), la cantidad de materia prima que se necesita para fabricar una unidad, el material desechado y la masa en el producto terminado. Se puede observar que la masa total de materia prima se reduce hasta 111,8 g si se proyecta la fabricación del aerógrafo con Al 6060-0.

Material	Materia Prima		Proceso de fabricación		Producto
	M_{MP_mat} (Kg·10 ⁻³)	Tipo	E_{mat} (Kw·s)	M_{MD_mat} (Kg·10 ⁻³)	M_{mat} (Kg·10 ⁻³)
Al 6066-O	109,1	Chapa, Barra, Tubo	25,93	53,9	55,2
Al 6066-O	2,75	Barra	1,40	1,37	1,38
PTFE	0,038	Barra	0,06	0,015	0,023
EPDM	0,075	Comercial	-	-	0,075

Tabla C3.9. Aerógrafo - Ciclo 2 de rediseño. Materiales utilizados en la fabricación.

En la Tabla C3.10 se indica, para cada una de las máquinas del proceso productivo, el tiempo total empleado en la fabricación de una unidad de producto, la energía consumida y el desgaste que experimentan las herramientas durante el procesado. Se puede observar que los consumos de energía en procesos de mecanizado disminuyen notablemente respecto a los calculados previamente.

Proceso	Máquina	Nº	t_{proc} (s)	E_{proc} (Kw·s)	D_h (Kg·10 ⁻³)
Cizallado	Cizalla hidráulica QC12Y	1	5	0,43	-
Conformado	Prensa Hellen Y32-100	1	9	0,94	-
Mecanizado	Sierra de cinta Masko BZH	1	3,93	0,22	1,21
Mecanizado	Torno CNC Haas ST-10	1	143,1	1,66	0,88
Mecanizado	Torno CNC Haas DS-30	1	550,8	8,17	5,15
Mecanizado	Torno CNC Haas DS-30Y	1	784,9	13,76	6,14
Mecanizado	CNC 3 ejes/vertical VF-1 Haas	1	168,1	2,16	1,09
Soldadura	Equipo TIG DC 400-S	1	110	121,9	2,02 I_{gas}
Acabado	Rectificadora Malcus AR48	1	30	0,05	-
Acabado	Amoladora angular industrial LSV39	1	375	6,27	-

Tabla C3.10. Aerógrafo - Ciclo 2 de rediseño. Datos del proceso productivo.

▪ Evaluación de indicadores

A continuación se evalúan las métricas y los indicadores de sostenibilidad del ciclo 2 de rediseño. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla C3.11. La utilización de un material más ligero permite reducir la masa del aerógrafo (56,6 g) y la masa final del conjunto (477 g). No obstante, el estuche de madera es más pesado que el de PVC, lo que afecta a la variación relativa observada en la masa del conjunto. El consumo de energía para fabricar una unidad de producto (155,5 Kw·s) se reduce también en este ciclo de rediseño, mientras que el porcentaje de material desechado apenas varía (49,4%). Los costes de producción se incrementan ligeramente debido al mayor coste del estuche de madera y la producción no cambia.

Métricas ingenieriles					
$M_{\text{Aerógrafo}} \text{ (g)}$	$M_{\text{Conjunto}} \text{ (g)}$	$E_{\text{Pr}} \text{ (Kw·s)}$	%Res	$C_{\text{Pr}} \text{ (€)}$	Pr (ud/h)
56,6	477	155,5	49,4	58,5	7
Indicadores de sostenibilidad					
Dimensión medioambiental		Dimensión económica		Dimensión social	
$\text{GWP}_{100} \text{ (Kg CO}_2\text{-eq)}$	El99 (pt)	VA (€)	EE (€/pt)	$T_t \text{ (h)}$	$S_h \text{ (€/h)}$
0,46	118,7	11,5	0,096	0,118	194,1

Tabla C3.11. Aerógrafo - Ciclo 2 de rediseño. Métricas ingenieriles e indicadores de sostenibilidad.

La utilización de materiales alternativos mejora sensiblemente los indicadores medioambientales, que se reducen hasta 0,46 Kg CO₂-eq en el caso del GWP₁₀₀ y hasta 118,7 pt en el caso del El99. Considerando que los ingresos no se modifican, VA se estima en 11,5 € y EE en 0,096 €/pt. Los indicadores de la dimensión social no varían respecto al ciclo 1 de rediseño.

Fase 3. Comparación de diseños

Se ha optado por hacer una comparación global del proceso de rediseño. En la Figura C3.5 se resumen los cambios introducidos en el producto en cada ciclo y en la Figura C3.6 se muestran los cambios generados en el proceso de producción.

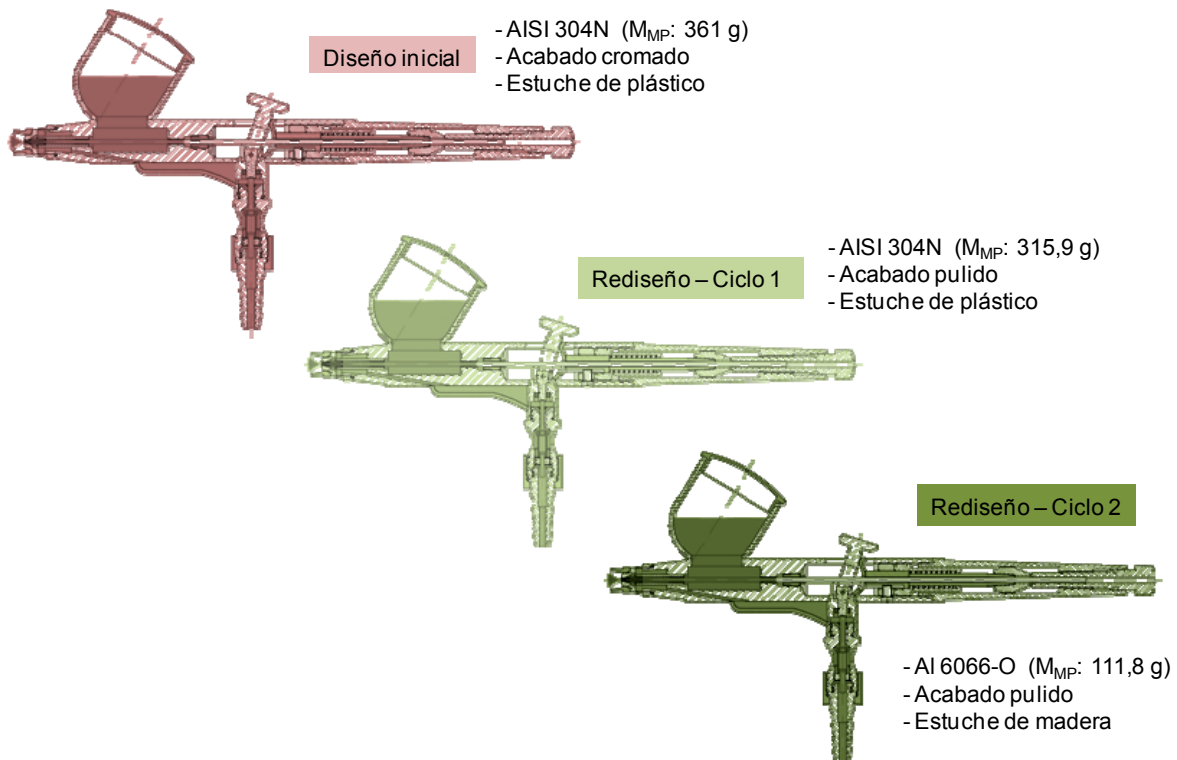


Figura C3.5. Aerógrafo - Principales cambios introducidos en el producto.

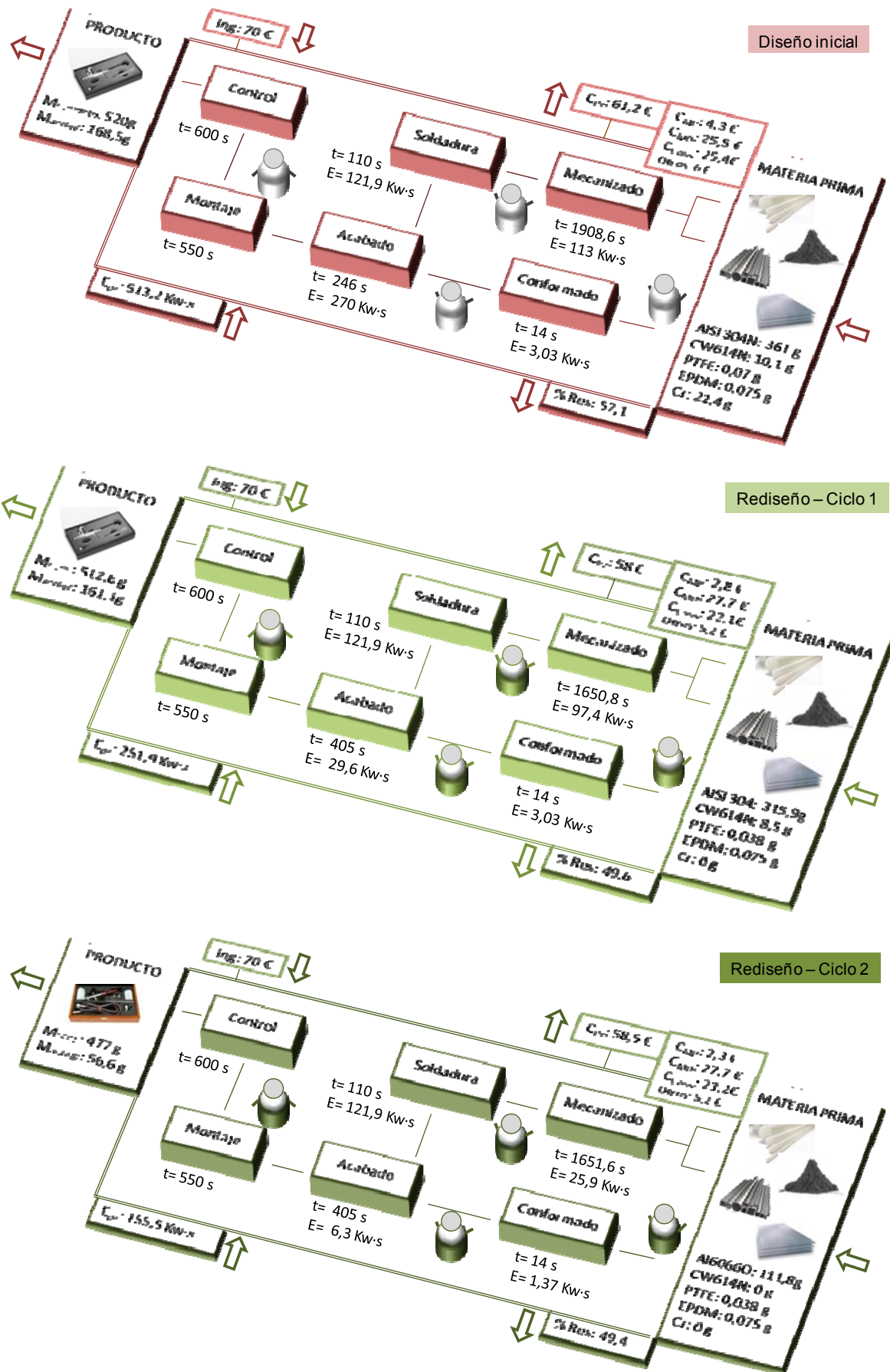


Figura C3.6. Aerógrafo - Esquema de producción y resumen de inventario.

En la Figura C3.7 se comparan las métricas ingenieriles utilizadas en el estudio. La variación se expresa de manera porcentual tomando como referencia el diseño inicial. Se pueden observar los siguientes resultados:

- La masa del conjunto (aerógrafo y estuche) se reduce 1,5% en el ciclo 1 y 8,3% en el ciclo 2 de rediseño. En este último caso la disminución en la masa del aerógrafo queda compensada, en parte, por el aumento de la masa del estuche.
- La masa del aerógrafo disminuye ligeramente en el ciclo 1 (4,4%) y se reduce drásticamente en el ciclo 2 (66,4%) en el cual se sustituye el acero inoxidable por una aleación de aluminio.
- La energía consumida en producción se reduce 51% en el ciclo 1, debido a la optimización de los procesos de mecanizado y a los cambios introducidos en el proceso de acabado, y se reduce hasta 69,7% en el ciclo 2 de rediseño, debido a un menor consumo en el procesado de los materiales.
- El material desechado se reduce 13,2% en el ciclo 1, ya que se mejora la selección de materia prima utilizada en la fabricación del aerógrafo y prácticamente no cambia en el ciclo 2.
- Los costes globales de producción se reducen, respecto al diseño inicial, 5,3% en el ciclo 1 y 4,4% en el ciclo 2. Por tanto, el ciclo 2 no mejora esta métrica. Esto es debido a que el estuche de madera tiene un coste mayor.
- La producción aumenta 12% en el ciclo 1 y se mantiene en el ciclo 2. Esto se debe a la optimización de los procesos y a la incorporación de un trabajador más.

La variación que experimentan los indicadores de sostenibilidad en el proceso global de rediseño se puede analizar en los gráficos de la Figura C3.7.

- Dimensión ambiental:

El impacto ambiental del producto disminuye progresivamente en cada ciclo de rediseño. Esto se debe a la adecuada selección de materia prima y a la sustitución del proceso de cromado, en el primer ciclo, y a la utilización de materiales con menor impacto, en el segundo ciclo. GWP_{100} disminuye, respecto al valor inicial, 0,75 Kg CO_2 -eq después del ciclo 1 de rediseño y 1,08 Kg CO_2 -eq después del ciclo 2. EI99 disminuye 69,1 y 346,4 pt después de cada ciclo.

- Dimensión económica:

Se obtienen resultados positivos. El valor añadido aumenta, respecto al valor inicial, 36,3% en el primer ciclo (3,2€). El segundo ciclo no permite seguir aumentando el beneficio económico, pero éste sigue siendo positivo y considerablemente superior al inicial. Mientras, el indicador de eco-eficiencia se incrementa en cada ciclo de rediseño, especialmente en el ciclo 2, debido a la considerable disminución de EI99.

- Dimensión social:

El tiempo promedio de trabajo empleado en la fabricación del producto se reduce casi el 9% (0,012 h) debido a una mejora de los tiempos de proceso y a una adecuada planificación de los recursos disponibles (se incorpora un trabajador más). También aumentan los costes de la mano de obra, lo que supone que el salario/hora se incremente un 22% (35€). En el ciclo 2, no se producen cambios.

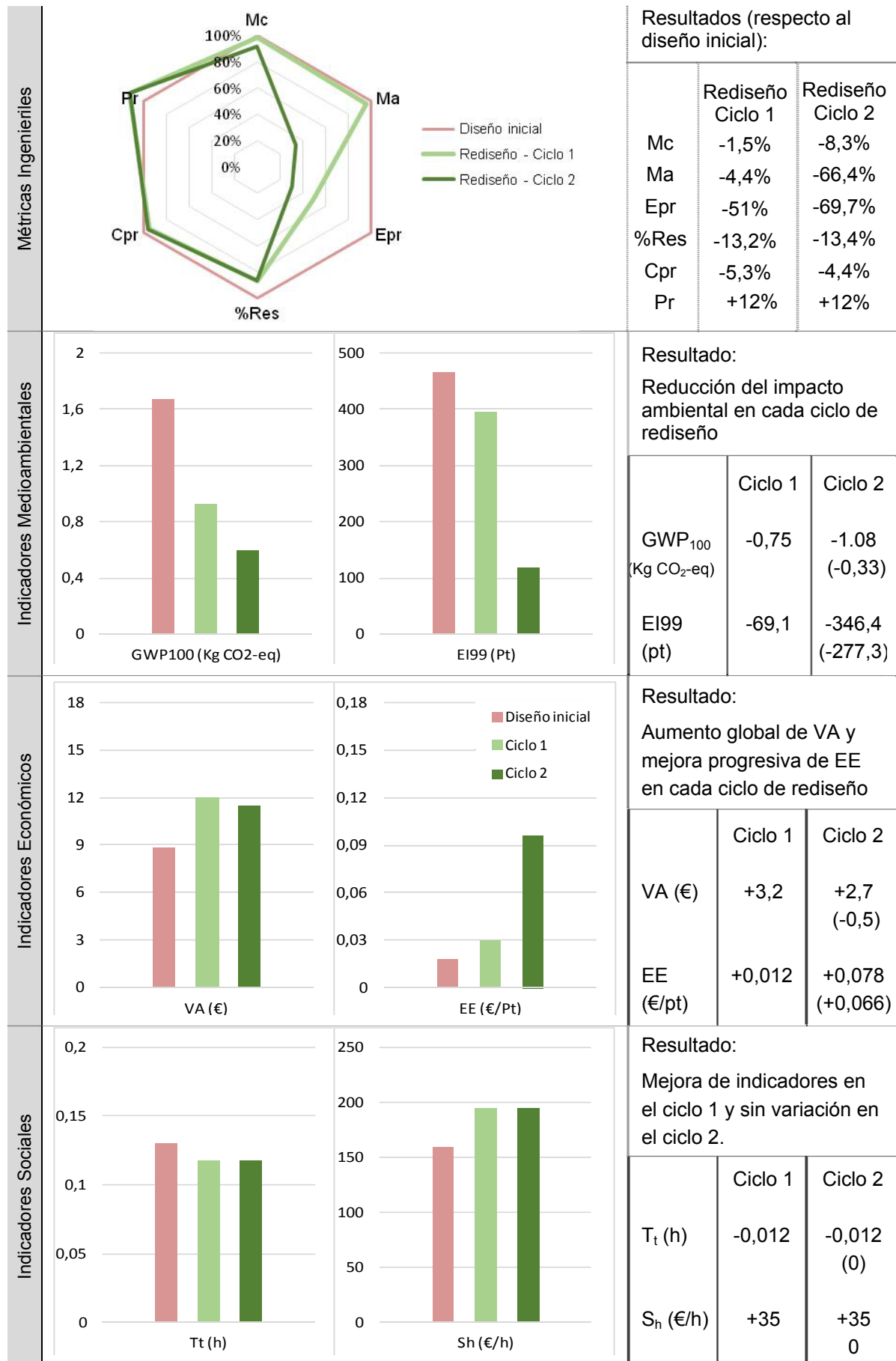


Figura C3.7. Aerógrafo - Comparación de indicadores de sostenibilidad.

Caso 3 - Conclusiones

En este caso, el producto objeto de estudio es un aerógrafo y la aplicación de la metodología consta de dos iteraciones. Se parte del proyecto de desarrollo de producto y también se proyecta el rediseño en cada uno de las iteraciones realizadas. Las fases 1) Evaluación de la sostenibilidad y 2) Rediseño de producto, de cada iteración forman un ciclo de rediseño. En cada ciclo se aplican estrategias de sostenibilidad diferentes con el objetivo de lograr una mejora gradual de la sostenibilidad del diseño previo. Este planteamiento iterativo permite evaluar los resultados de cada ciclo, comparar su evolución y aportar los suficientes datos al equipo de diseño para decidir sobre el desarrollo final del producto.

En el primer ciclo de rediseño se han aplicado estrategias para disminuir el impacto del material desechado y del cromo. Para ello, se mejora la adquisición de materia prima y se propone un acabado pulido. En el segundo ciclo, se propone utilizar materiales con menor impacto ambiental, tanto en el aerógrafo como en el estuche que lo contiene. Las especificaciones del producto indicadas inicialmente, relacionadas con el control de flujos, resistencia a la corrosión, operaciones de limpieza y mantenimiento se mantienen.

La sostenibilidad del producto experimenta la siguiente evolución:

- Dimensión ambiental: En cada ciclo de rediseño, los indicadores mejoran. De forma global, GWP_{100} disminuye 1,08 $KgCO_2\text{-eq}$ y EI99 disminuye 346,4 pt.
- Dimensión económica: En el ciclo 1 de rediseño se mejora el VA y en el ciclo 2 se reduce respecto al obtenido en el ciclo 1. El indicador EE mejora en cada ciclo y muy notablemente en ciclo 2, al disminuir EI99.
- Dimensión social: En el ciclo 1 de rediseño, los indicadores sociales mejoran y en el ciclo 2 no se producen cambios. Se incorpora un operario más, se reduce el tiempo promedio de trabajo y se elimina el riesgo para la salud de los trabajadores que supone el proceso de cromado.

En los estudios previos, la determinación de los focos de impacto en el diseño inicial se basó en el análisis de los componentes y de los materiales que forman parte del producto. En este caso, se ha realizado un análisis que evalúa el impacto de diversos factores. En particular, se ha tratado de valorar el impacto relativo que tienen factores como la utilización de Cromo y el material desechado durante el proceso de fabricación. Además, en este caso de estudio se ha incluido como factor de análisis el estuche que contiene al producto y sirve para su comercialización, aunque su fabricación no sea realizada en la instalación productiva. Se ha optado por trabajar con la métrica de la masa del conjunto para mostrar los cambios introducidos en este factor del diseño.

Tras la aplicación de la metodología de desarrollo sostenible a tres casos de estudio diferentes se puede concluir que la selección y utilización de métricas e indicadores adecuados en cada producto es una tarea crítica para analizar de forma eficaz la sostenibilidad del producto y detectar los focos de impacto.

CASO 4 - LECHE

En este caso se estudia el proceso de obtención de leche en una explotación de ganado vacuno. El tipo de producto y las características de la instalación productiva son muy diferentes a los tratados en los casos anteriores. No obstante, la metodología de desarrollo sostenible de producto se aplica siguiendo las mismas fases y seleccionando un conjunto adecuado de métricas e indicadores que permiten la comparación entre la sostenibilidad del producto inicial y el rediseño.

Las granjas de ganado vacuno pueden ser de carácter intensivo o extensivo. Las de carácter intensivo mantienen las vacas en un recinto acondicionado donde se les proporciona la alimentación necesaria. En las explotaciones de carácter extensivo, las vacas se pueden mover en un terreno abierto donde pueden alimentarse de pasto. El proceso de ordeño es más o menos automatizado dependiendo de la tecnología disponible en la explotación y se realiza habitualmente con ayuda de máquinas de vacío. El número de ordeños varía de acuerdo al rendimiento a obtener. En este caso, se estudia una granja de carácter intensivo en la que se realizan dos ordeños diarios.

Características y especificaciones del producto

La leche proporciona nutrientes esenciales y es una fuente importante de energía alimentaria, proteínas de alta calidad y grasas. La leche puede contribuir considerablemente a la ingestión necesaria de nutrientes como el calcio, magnesio, selenio, riboflavina, vitamina B12 y ácido pantoténico. La especie de animal lechero, su raza, edad y dieta influyen en el color, sabor y composición de la leche. Además influye el estado de lactancia, el número de pariciones, el sistema agrícola, el entorno físico y la estación del año.

La leche entera de vaca está compuesta principalmente por agua, iones como sal, minerales y calcio, glúcidos como la lactosa, proteínas como la caseína y vitaminas A,D,B y E. Las grasas constituyen alrededor del 3-4% del contenido sólido, las proteínas en torno al 3,5% y la lactosa el 5%. En la Tabla C4.1 se muestran los principales nutrientes en 100 g de leche entera.

Nutrientes	Cantidad
Calorías	63-66 Kcal
Grasa	3,5-4 g
Azúcares	4,6-4,9 g
Proteínas	3-3,2 g
Carbohidratos	4,6-4,9 g
Calcio	124 mg
Sodio	48 mg
Vitaminas	28 mg

Tabla C4.1. Cantidad de nutrientes en 100 g de leche entera de vaca (alimentos.org.es).

Para que la leche cruda pueda considerarse de buena calidad, no debe contener residuos ni sedimentos, no debe ser insípida ni tener color y olor anormales, debe tener un contenido en bacterias bajo, no debe contener sustancias químicas como antibióticos o detergentes y debe tener una composición y acidez normales. Para lograr esa calidad, se han de aplicar buenas prácticas a lo largo de toda la cadena láctea.

El Programa conjunto FAO/OMS (**FAO, 2018**) elabora normas relacionadas con aplicación de medidas sanitarias y fitosanitarias en el comercio de alimentos y también para leche y productos lácteos. Las siguientes pruebas permiten controlar la calidad de la leche:

- Cantidad (medida en volumen o peso);
- Características organolépticas (aspecto, sabor y olor);
- Características de composición (especialmente contenido de materia grasa, materia sólida y proteínas);
- Características físicas y químicas;
- Características higiénicas;
- Adulteración (con agua, conservantes, sólidos añadidos,...)
- Presencia de residuos de medicamentos.

La alimentación de las vacas influye de forma determinante en la composición y cantidad final de nutrientes de la leche. Una correcta mezcla de alimentos permite obtener leche con la adecuada cantidad de nutrientes. La Fundación Española para el Desarrollo de la Nutrición Animal (**FEDNA, 2010**) proporciona tablas de composición y valor nutritivo de alimentos que pueden ser consultadas para definir los ingredientes utilizados en la alimentación del ganado. Basados en los datos proporcionados por un nutricionista, en la Tabla C4.2 se muestran las cantidades de nutrientes que deben ingerir al día las vacas en fase de producción y sirven para definir la composición adecuada de materia prima empleada en la alimentación. Los nutrientes se expresan referenciados a la materia seca o alimentación aportada sin humedad.

Nutrientes	Cantidad	Unidad	Total (Kg)
Materia seca	21-25	Kg	21-25
Fibra detergente ácida	25,5-30,5	% de MS	5,3-7,6
Fibra detergente neutra	43-48	% de MS	9-12
Proteína bruta	16-19	% de MS	3,4-4,8
Proteína no degradable	43-45	% de MS	9-11,25
Calcio (Ca)	1,00-1,10	% de MS	0,21-0,27
Magnesio (Mg)	0,34-0,38	% de MS	0,07-0,10
Fosforo (P)	1,55-1,60	% de MS	0,33-0,40
Sodio (Na)	0,22-0,26	% de MS	0,05-0,07

Tabla C4.2. Alimentación de las vacas - Cantidad de nutrientes recomendados por vaca y día.

PROCESO DE REDISEÑO SOSTENIBLE

Fase 1a - Evaluación de la sostenibilidad (diseño inicial)

▪ *Inventario de producción*

El estudio se ha llevado a cabo en una explotación láctea situada en la provincia de Huesca. Es una granja de carácter intensivo de tamaño medio-bajo y con un promedio de 38 vacas en fase de producción. Se recopilan las entradas y salidas generadas por las actividades propias de la explotación. Estas actividades consisten principalmente en tareas de alimentación y ordeño de los animales y tareas de mantenimiento y limpieza del recinto.

En la Figura C4.1 se muestra un esquema del proceso productivo, con las entradas y salidas que intervienen en el sistema. Se indica la cantidad de cada una de las materias primas utilizadas en el proceso de obtención de leche y las correspondientes salidas de productos y subproductos. Se muestran los consumos de energía en cada actividad y el consumo global de energía a lo largo del proceso productivo. Además se muestran los principales flujos económicos intercambiados por el sistema. Todos los datos se expresan por litro de leche producido, que es la unidad funcional utilizada en el análisis.

Las entradas se pueden clasificar en materia prima utilizada en la alimentación de los animales (ensilado de maíz, pienso, alfalfa y agua); productos para la limpieza de los equipos de extracción y almacenamiento de la leche (agua, jabón, ácido y protector), medicamentos, paja para el acondicionamiento de la instalación y gasóleo para el funcionamiento de los tractores. Cada animal en fase de producción requiere por día, en torno a 40 Kg de comida y entre 80 y 100 litros de agua, dependiendo de la estación del año. En limpieza se emplea agua acompañada de un detergente y un ácido de desinfección específicos. Además, dentro de las entradas al sistema, se ha de contabilizar el consumo de energía en los diferentes equipos utilizados para el desarrollo de las actividades dentro de la explotación láctea (máquina de ordeño, tanque de almacenamiento y refrigeración de leche, dos calentadores de agua, de 100 y 50 litros cada uno).

Por otra parte, la granja origina unas salidas: leche (producto principal), estiércol (subproducto), ganado (vacas y terneros), residuos procedentes de medicamentos y aguas residuales de la instalación. En promedio la producción diaria de leche por vaca es de 28 litros. Se obtiene a través de dos ordeños y es una de las actividades a las que el ganadero tienen que dedicar más tiempo, ya que requiere la entrada, colocación y retirada de cada animal. El estiércol se obtiene tras la limpieza de la zona de estancia de las vacas. Éste se retira junto con la paja utilizada una vez cada dos días y se acondiciona el suelo con paja nueva y seca. Además, cada año se venden en torno a 6 vacas y 20 terneros. Los residuos de medicamentos son recogidos cada 6 meses por una empresa especializada.

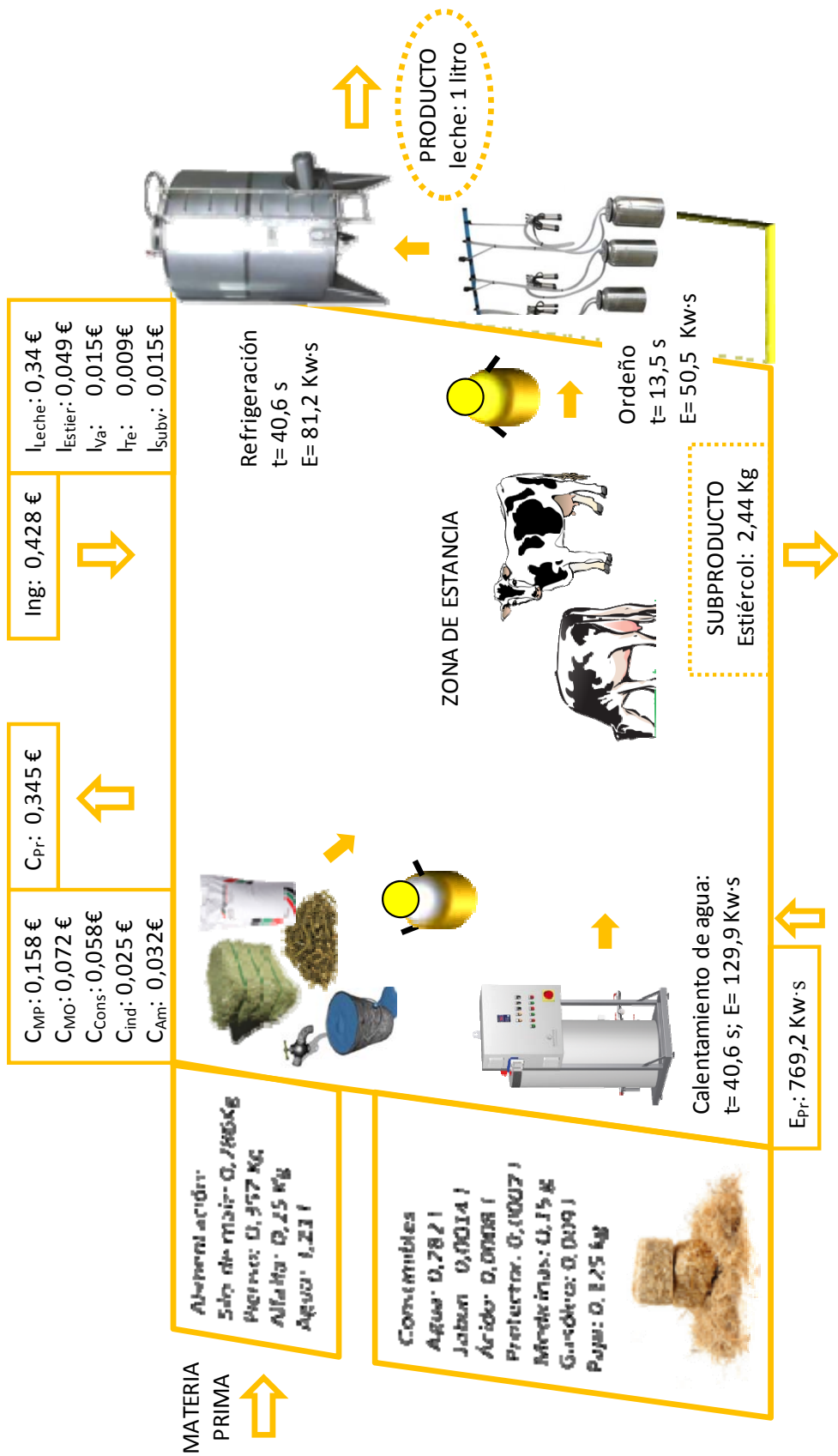


Figura C4.1. Obtención de leche. Esquema de producción y resumen de inventario.

En la Tabla C4.3 se indican, para cada una de las actividades que intervienen en el proceso productivo, los recursos utilizados, el tiempo empleado y la energía consumida para obtener un litro de leche. Las tareas de preparación y distribución de la comida y de limpieza del recinto se realizan con la ayuda de dos tractores. Las actividades diarias de la explotación son realizadas solamente por un trabajador.

Proceso	Máquina	Nº	t_{proc} (s)	E_{proc} (Kw·s)
Mezclado y distribución de comida	Fiat 780 e DT Massey Fergusson 6180	2	3,38	343,5
Ordeño	Máquina de ordeño DeLaval 6 (disposición en paralelo)	1	13,53	50,5
Refrigeración y almacenamiento de leche	Tanque refrigeración Alfa-Laval 1700 I	1	40,6	81,2
Calentamiento de agua	Termo agua EDESA Capacidades: 50 y 100l	2	40,6	129,9
Limpieza del recinto	Fiat 780 e DT	1	3,38	171,7

Tabla C4.3. Obtención de leche. Datos del proceso productivo inicial.

En la Tabla C4.4 se muestran los componentes de la materia prima utilizada en la alimentación de las vacas. En cada caso, se indica la cantidad requerida para producir un litro de leche, el precio por unidad y el coste final. El detalle de todos los costes de producción se puede consultar en el Anexo C4 y se muestra de manera resumida en la Figura C4.1. La explotación tiene unos costes indirectos debidos principalmente al servicio de veterinario.

Tipo de entrada	Componente	Cantidad (Kg)	$Pr_{\text{MP_mat}}$ (€/ud)	$C_{\text{MP_mat}}$ (€)
Materia prima alimentación	Ensilado de maíz	0,786	0,035	0,027
	Pienso	0,357	0,27	0,096
	Alfalfa	0,250	0,12	0,030
	Agua	3,214 l	0,001 €/l	0,004

Tabla C4.4. Obtención de leche. Datos de materia prima en el proceso productivo inicial.

Los ingresos de la explotación no solo proceden de la obtención de leche. También de la recogida y venta de estiércol y de la comercialización de animales, tanto vacas como animales jóvenes no destinados a la producción de leche. Dadas las características del sector, se debe tener en cuenta que las explotaciones de este tipo reciben una subvención por parte de la administración. En la Tabla C4.5 se resumen las actividades que suponen un ingreso económico, la cantidad, el precio por unidad y el importe anual ingresado. El precio indicado para la leche es de 0,31 €/l, que es el que proporciona el Ministerio de Agricultura, Pesca, Alimentación y Medio Ambiente (**MAPAMA, 2018**).

Tipo	Actividad	Cantidad (Ud/año)	Precio (€/Ud)	Importe (€)
Ingreso	Leche	388360 l	0,31 €/l	120391
	Venta de estiércol	950216 Kg	0,02 €/Kg	19006
	Venta de vacas	6 animales	1000	6000
	Venta de terneros	20 animales	172,5	3450
	Subvenciones	-	-	6000

Tabla C4.5. Obtención de leche. Datos de diferentes ingresos ligados a la explotación.

▪ Evaluación de indicadores

Una vez realizado el inventario, se calculan las métricas e indicadores de sostenibilidad que caracterizan el proceso inicial de obtención de leche. En este caso de estudio se han seleccionado métricas que permiten caracterizar la cantidad de materia prima para alimentación y la cantidad de subproducto generado (estiércol). Se ha considerado adecuado caracterizar el impacto ambiental a través de los indicadores GWP_{100} y Acidificación (Ac), que son habitualmente utilizados en este sector. Por otra parte, se utilizan VA y RSA como indicadores económicos de la sostenibilidad. Los resultados se muestran en la Tabla C4.6.

Métricas ingenieriles					
Malimento (Kg)	Agua (l)	E_{Pr} (Kw·s)	$M_{estiércol}$ (Kg)	C_{Pr} (€)	Pr (l/día)
1,393	3,496	769,2	2,446	0,345	1064
Indicadores de sostenibilidad					
Dimensión medioambiental		Dimensión económica		Dimensión social	
GWP_{100} (Kg CO ₂ -eq)	Ac (g SO ₂ -eq)	VA (€)	RSA	T_t (h)	S_h (€/h)
0,643	0,007	0,054	0,069	0,0066	10,91

Tabla C4.6. Obtención de leche - Diseño inicial. Métricas e indicadores de sostenibilidad.

Para obtener un litro de leche se requieren 1,393 Kg de alimento y 3,496 l de agua (3,214 l son para consumo y 0,282 l son utilizados en procesos de limpieza). La explotación láctea requiere para su funcionamiento 769,2 Kw·s de energía. Se obtienen 2,446 Kg de estiércol como subproducto. Los costes de producción son 0,345 €. La granja cuenta con 38 vacas en fase de producción de las que se obtiene, diariamente, 1064 litros de leche. Además, obtener un litro de leche genera unas emisiones de 0,643 Kg CO₂-eq y 0,007 g SO₂ eq. El cálculo de indicadores ambientales se puede consultar en el Anexo C4, donde además se dan datos correspondientes a Eutrofización (Eu). De acuerdo con unos ingresos de 0,428 € por litro de leche producido, se obtiene un valor añadido de 0,054 € y una rentabilidad sobre activos del 0,069. El tiempo de trabajo empleado en la obtención de un litro de leche es 0,0066 h y el salario/hora es 10,91 €/h.

A continuación, se analizan los factores de impacto y se determinan cuáles son los que tienen mayor incidencia. En la Figura C4.2 se muestra la distribución del GWP_{100} y de los costes de producción considerando los materiales y consumibles utilizados. En la Figura C4.3 se muestra la distribución de tiempos y costes asociados a las actividades productivas.

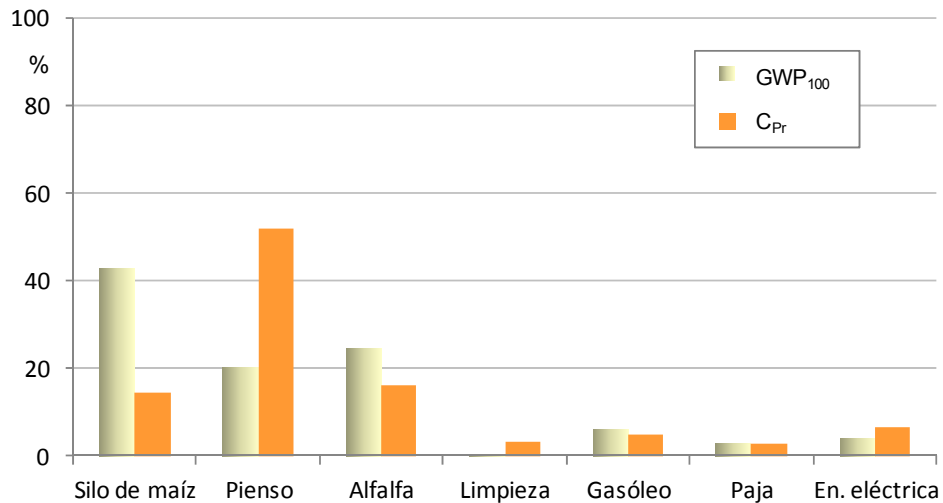


Figura C4.2. Distribución de impacto ambiental y costes asociados a materiales y consumos.

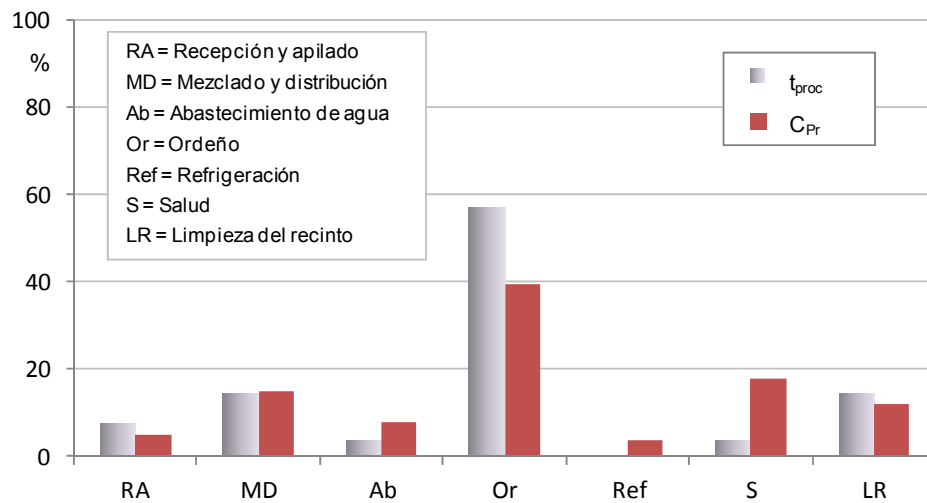


Figura C4.3. Distribución de tiempos y costes asociados a las actividades productivas.

La materia prima destinada a la alimentación tiene un elevado impacto ambiental y, en particular, el ensilado de maíz (42%) y la alfalfa (24%) son los componentes con mayor contribución. Dentro de los costes de adquisición de materiales y consumibles, el pienso con un 53%, es el que tiene una contribución más destacada. Respecto a las actividades productivas, el ordeño es la que requiere más tiempo y la que genera los costes más elevados (debido a los costes asociados a mano de obra). Las actividades de distribución de comida y de limpieza del recinto tienen un impacto relativo en torno al 15%. Las actividades relacionadas con la salud animal tienen un coste bastante elevado, ya que incluyen los medicamentos y las visitas regulares del veterinario.

Fase 2 - Rediseño de producto

A partir de los resultados obtenidos en el análisis previo, las estrategias de rediseño que se plantean se centran en disminuir el impacto de la materia prima utilizada en alimentación y en reducir el tiempo dedicado a las tareas de ordeño. Para ello, se proponen varias alternativas de alimentación y además, la incorporación de un nuevo trabajador con una asignación del 50%.

La alimentación de las vacas es esencial para conseguir una buena calidad de la leche y para mantener la producción. Para plantear alternativas de alimentación que aporten a las vacas los nutrientes adecuados se recurrió al asesoramiento de un nutricionista. Se hicieron dos propuestas que contemplaban dos mezclas de comida diferentes (Tabla C4.7). En la primera alternativa se propone un cambio de ensilado, optando por uno de cebada en lugar de maíz y manteniendo las mismas proporciones en los alimentos que forman la mezcla. En la segunda alternativa, se propone sustituir el ensilado de maíz por otro de paja de cebada y modificar las proporciones de alimentos para equilibrar los nutrientes aportados.

Mezclas para alimentación	Componente	Cantidad (Kg)	GWP ₁₀₀ (Kg CO ₂ -eq)	Ac (g SO ₂ -eq)
Diseño inicial	Ensilado de maíz	0,786	0,275	0,0044
	Pienso	0,357	0,129	0,0008
	Alfalfa	0,251	0,156	0,0017
	Total	1,394	0,560	0,0069
Alternativa 1	Ensilado de cebada	0,786	0,418	0,0045
	Pienso	0,357	0,129	0,0008
	Alfalfa	0,251	0,156	0,0017
	Total	1,394	0,703	0,0070
Alternativa 2	Paja	0,143	0,021	0,0001
	Pienso	0,500	0,180	0,0012
	Alfalfa	0,357	0,223	0,0024
	Total	1	0,424	0,0037

Tabla C4.7. Obtención de leche. Alternativas de alimentación.

En la Tabla se indican para cada una de las mezclas, los alimentos que la componen, la cantidad que se proporciona a las vacas para obtener un litro de leche y el impacto ambiental generado (GWP₁₀₀ y Ac) por cada alimento individual y cada alternativa de alimentación. En la segunda alternativa, la cantidad total de alimento es menor y genera también un impacto ambiental menor. Puesto que la cantidad de alimento disminuye, algunas actividades del proceso productivo, como las de transporte, mezclado y distribución de la comida, cuyo consumo de energía depende de la masa que se ha de manipular, pueden reducir también el consumo. Esta alternativa de alimentación se implementa realmente en el proceso productivo durante un periodo de 6 meses.

Fase 1b - Evaluación de la sostenibilidad (rediseño)

▪ *Inventario de producción*

Se recopilan las entradas y salidas que resultan de los cambios introducidos. En la Tabla C4.8 se muestran los componentes de la materia prima utilizada en la alimentación de las vacas, la cantidad requerida para producir un litro de leche, el precio por unidad y el coste final. Se observa que los costes del pienso y de la alfalfa se incrementan respecto a los se obtenían en la alimentación inicial. El coste total de la materia prima se incrementa en 0,03 € por litro de leche y supone un incremento significativo de los costes de producción globales.

Entrada	Componente	Cantidad (Kg)	Pr _{MP_mat} (€/ud)	C _{MP_mat} (€)
Alimentación	Paja	0,143	0,04	0,006
	Pienso	0,500	0,27	0,135
	Alfalfa	0,357	0,12	0,043
	Agua	3,214 l	0,001 €/l	0,004

Tabla C4.8. Obtención de leche. Datos de materia prima en el proceso productivo rediseñado.

En la Tabla C4.9 se indican, para cada una de las actividades que intervienen en el proceso productivo, los recursos utilizados, el tiempo empleado y la energía consumida para obtener un litro de leche. Se observa que la nueva alimentación (más ligera) y la utilización de recursos adicionales (un trabajador más) permiten reducir el consumo de energía.

Proceso	Máquina	Nº	t _{proc} (s)	E _{proc} (Kw·s)
Mezclado y distribución de comida	Fiat 780 e DT Massey Fergusson 6180	2	3,38	252,6
Ordeño	Máquina de ordeño DeLaval 6 (disposición en paralelo)	1	10,15	37,9
Refrigeración y almacenamiento de leche	Tanque refrigeración Alfa-Laval 1700 l	1	40,6	81,2
Calentamiento de agua	Termo agua EDESA Capacidades: 50 y 100l	2	40,6	129,9
Limpieza del recinto	Fiat 780 e DT	1	3,38	171,7

Tabla C4.9. Obtención de leche. Datos del proceso productivo rediseñado.

En la Tabla C4.10 se resumen los ingresos que se obtienen en el rediseño, no solo los obtenidos por producción de leche, sino también por venta de estiércol y venta de ganado, así como la subvención recibida por la administración. Se indica la cantidad, el precio por unidad y el importe anual ingresado. El precio indicado para la leche se mantiene en 0,31 €/l.

Los ingresos por venta de estiércol se incrementan un 6%. La cantidad que se genera de este subproducto aumenta, puesto que la nueva alimentación contiene un porcentaje más elevado de materia seca. La composición de cada mezcla se puede consultar en el Anexo C4. El resto de ingresos no se modifican.

Tipo	Actividad	Cantidad (Ud/año)	Precio (€/Ud)	Importe (€)
Ingreso	Leche	388360 l	0,31 €/l	120391
	Venta de estiércol	1009736 Kg	0,02 €/Kg	20195
	Venta de vacas	6 animales	1000	6000
	Venta de terneros	20 animales	172,5	3450
	Subvenciones	-	-	6000

Tabla C4.10. Obtención de leche - rediseño. Datos de diferentes ingresos ligados a la explotación.

▪ Evaluación de indicadores

Se calculan las métricas e indicadores de sostenibilidad correspondientes al rediseño. Estos se muestran en la Tabla C4.11. Para obtener un litro de leche se necesita 1 Kg de alimento y 3,496 litros de agua. Se consumen 686,8 Kw·s de energía y se genera 2,605 Kg de estiércol. Los costes de producción aumentan a 0,395€ (debido al incremento de los costes en materia prima para alimentación y en mano de obra). La producción diaria promedio es 1064 litros/día (28 litros por vaca y día), por tanto, se mantiene igual a la del proceso inicial. También se mantiene en 38 el número de vacas en fase de producción.

Métricas ingenieriles					
Malimento (Kg)	Agua (l)	E _{Pr} (Kw·s)	M _{estiércol} (Kg)	C _{Pr} (€)	Pr (l/día)
1	3,496	686,8	2,605	0,395	1064
Indicadores de sostenibilidad					
Dimensión medioambiental		Dimensión económica		Dimensión social	
GWP ₁₀₀ (Kg CO ₂ -eq)	Ac(g SO ₂ -eq)	VA (€)	RSA	T _t (h)	S _h (€/h)
0,5	0,004	0,007	0,009	0,0056	16,97

Tabla C4.11. Obtención de leche - rediseño. Métricas e indicadores de sostenibilidad en el rediseño.

El cálculo de indicadores muestra que para obtener un litro de leche, se generan unas emisiones de 0,5 Kg CO₂-eq y 0,004 g SO₂-eq. Los ingresos de la explotación no varían prácticamente. Puesto que los costes de producción se incrementan, VA disminuye a 0,007 € por litro de leche producido. RSA de la explotación láctea es de 0,009. El tiempo promedio de trabajo es de 0,0056 h y el salario hora de 16,97 €/h.

Fase 3. Comparación de diseños

A continuación, se analizan los cambios producidos en las métricas ingenieriles y en los indicadores de sostenibilidad.

En la parte superior de la Figura C4.4 se comparan las métricas ingenieriles utilizadas en el estudio, mostrando la variación porcentual del rediseño respecto al diseño inicial. Los cambios introducidos en la mezcla de materia prima para alimentación suponen un cambio considerable en la masa total de alimento que se reduce un 26,6%. La cantidad de agua no varía siendo en promedio 3,49 l por litro de leche producido. El consumo de energía en la explotación se reduce un 10,3% debido al cambio de alimentación (más ligera) y a la utilización de recursos adicionales (un trabajador más) que permite reducir el tiempo de ordeño. La masa de estiércol aumenta un 6% como consecuencia de que la alimentación contiene un porcentaje más elevado de materia seca. Los costes de producción se incrementan un 14,5% debido a dos factores, el aumento de los costes de materia prima para alimentación y el de los costes de mano de obra. El cálculo detallado de costes de producción se muestra en el Anexo C4. Finalmente, la producción diaria de leche se mantiene en un promedio de 1064 l.

La variación que experimentan los indicadores de sostenibilidad se muestra en los gráficos de la Figura C4.4. Se obtienen los siguientes resultados:

- Dimensión ambiental:

Una alimentación en la que el ensilado de maíz se sustituye por paja y se aumentan las proporciones de pienso y alfalfa, permite reducir el impacto ambiental de la leche en la etapa de producción. GWP₁₀₀ disminuye un 12% y Ac disminuye un 43%.

- Dimensión económica:

El cambio de alimentación incrementa notablemente los costes de materia prima (19%). Además, los costes de producción aumentan por la contratación de un trabajador para las tareas de ordeño. Los ingresos por producción de leche no varían y los de venta de estiércol aumentan ligeramente. En consecuencia, los indicadores económicos disminuyen. VA se reduce 0,047 € y RSA se reduce 0,06.

- Dimensión social:

La contratación de un trabajador permite reducir el tiempo promedio de trabajo un 15% y puesto que la mano de obra aumenta, el salario hora también se incrementa un 55%.

Estos resultados muestran que para la explotación láctea, una alimentación basada en ensilado de maíz, pienso y alfalfa tiene un rendimiento económico mayor que una alimentación basada en paja, pienso y alfalfa, pero tiene un impacto ambiental mayor. Por otra parte, el rendimiento económico disminuye si aumenta el número de trabajadores, pero los indicadores sociales de la sostenibilidad mejoran.

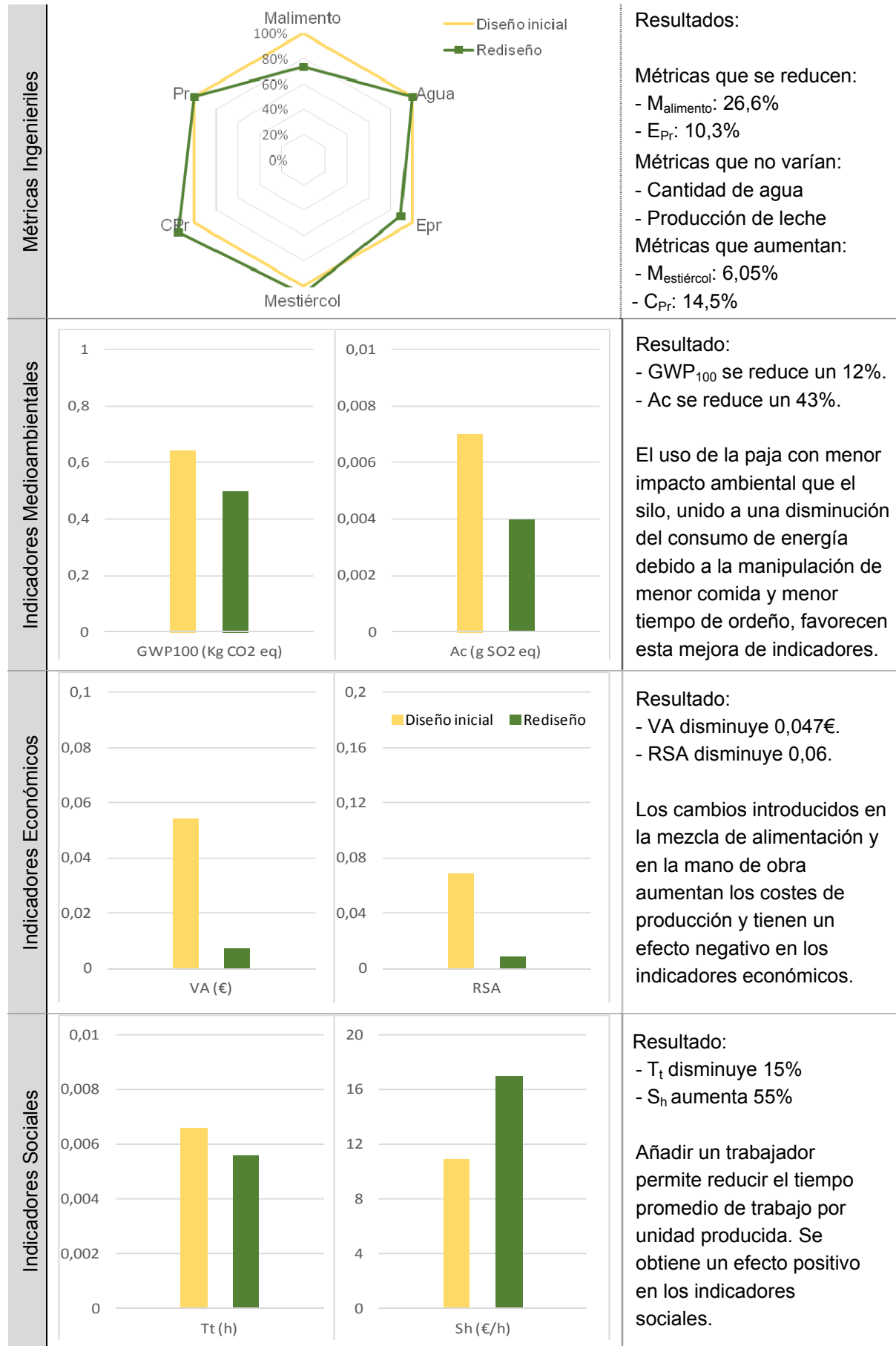


Figura C4.4. Obtención de leche - Comparación de indicadores de sostenibilidad.

Caso 4 - Conclusiones

En este caso, el producto objeto de estudio presenta unas características notablemente diferentes. Se analiza el proceso de obtención de leche en una explotación de ganado vacuno. El planteamiento y desarrollo de la metodología ha seguido las mismas fases que en estudios previos teniendo como objetivo proyectar el desarrollo sostenible del producto. Se parte de los datos obtenidos en una explotación láctea de tamaño medio-bajo y los resultados del rediseño se ponen en práctica en la misma explotación.

Se ha realizado la medición y seguimiento de las actividades que se llevan a cabo en la explotación, registrando entradas y salidas de materiales, energía y recursos. Se han planteado alternativas de rediseño y se ha realizado la cuantificación de métricas e indicadores. En este caso de estudio, se han seleccionado métricas que permiten caracterizar la materia prima para alimentación y la cantidad de subproducto generado (estiércol), el indicador de impacto ambiental de acidificación y el indicador económico de rentabilidad sobre activos. El objetivo ha sido adaptar el análisis, medir convenientemente resultados y plantear alternativas eficaces.

En el análisis de impactos se ha detectado que la materia prima utilizada para alimentación tiene un elevado impacto ambiental y que el coste de adquisición de materias primas supone un elevado porcentaje de los costes de producción. Se propone una mezcla para alimentación alternativa que aporta los nutrientes adecuados y tiene una masa global sensiblemente menor. La masa de alimento se reduce 26,6% y el consumo de energía en la explotación se reduce 10,3%. Por otra parte, la masa de estiércol aumenta 6%. La aplicación de esta estrategia de rediseño ha permitido reducir los indicadores ambientales GWP_{100} (12%) y Ac (43%) pero no favorece a los indicadores económicos ya que VA se reduce 0,047 € y RSA disminuye 0,06. Estos resultados muestran que la alimentación inicial basada en ensilado de maíz, pienso y alfalfa tiene un rendimiento económico mayor. Con una alimentación formada por una mezcla de paja, pienso y alfalfa se reduce el impacto ambiental pero disminuye el rendimiento económico. En el rediseño también se ha puesto en práctica la incorporación de un trabajador para apoyar las tareas de ordeño. Esta estrategia ha permitido mejorar los indicadores sociales de T_t (15%) y S_h (55%) pero implica una reducción de los indicadores económicos, debido al aumento de los costes de producción.

La metodología de desarrollo sostenible de producto se ha podido aplicar de forma consistente a un producto que procede de un sector y tiene unas características muy diferentes a los productos que fueron estudiados en los casos anteriores. Para ello se ha utilizado un conjunto de métricas e indicadores de sostenibilidad adecuados. Además, este caso de estudio ha permitido desarrollar el rediseño proyectado, valorando el cumplimiento de objetivos a través de su puesta en práctica. Se considera que el estudio refuerza la validez del esquema metodológico planteado en la tesis.

Capítulo 4.

Conclusiones

En este último capítulo se resumen los resultados de la investigación desarrollada, se exponen las contribuciones de la tesis y se plantea el trabajo que se pretende abordar en el futuro.

A lo largo de los capítulos 1 y 2 se ha revisado el concepto de sostenibilidad y los métodos de desarrollo de producto, mostrando el abundante trabajo de investigación realizado en las últimas décadas para lograr la integración de lo sostenible en los procesos de generación y fabricación de productos. Apoyada en los métodos y herramientas existentes, se ha propuesto una metodología para proyectar el desarrollo de productos sostenibles. La metodología está formada por tres etapas principales: evaluación de la sostenibilidad, rediseño de producto y comparación de diseños. Se pone en práctica en una serie de casos de estudio que son desarrollados en el capítulo 3.

En cada caso, la aplicación sistemática de estas fases ha permitido lograr un diseño mejorado teniendo en cuenta las tres dimensiones de la sostenibilidad. El análisis de estos productos ha partido de diferentes condiciones. En dos casos de estudio el inventario inicial se obtiene a partir del proyecto de desarrollo de producto y se proyecta su rediseño. En otros dos casos de estudio se parte de los datos que proporciona la instalación productiva y se proyecta su rediseño. Además, en el último caso analizado, se obtienen datos de proceso en una instalación real, se proyecta el rediseño y se comprueba el resultado sobre la propia instalación.

4.1. Resumen de resultados

En esta investigación se ha realizado una completa revisión de métodos y herramientas utilizados en eco-diseño de producto. Se ha hecho una selección de trabajos de investigación que a lo largo de las últimas décadas se han centrado en el análisis y evaluación de la dimensión ambiental de la sostenibilidad. En estos trabajos, se aplica una metodología de diseño de productos basada en el ciclo de vida y en la utilización de indicadores específicos para realizar la evaluación de impactos. Se diferencia además la utilización de herramientas de evaluación de impacto ambiental y la utilización de herramientas de mejora ambiental. Se han revisado y comparado métodos y herramientas de trabajo para comprender y conocer cómo se aplica actualmente el concepto de sostenibilidad en el proceso de diseño y desarrollo de producto.

Se ha elaborado y se ha puesto en práctica una metodología que incluye la sostenibilidad como concepto fundamental en la ingeniería de diseño de producto y que permite su evaluación a través de indicadores adecuados. Se ha realizado un tratamiento metódico de la información y de los datos que se derivan de la aplicación de estrategias de sostenibilidad en productos industriales y de consumo. Se han seleccionado indicadores capaces de medir el progreso relativo de la sostenibilidad y que contemplan cada una de sus dimensiones. El esquema metodológico se compone de tres fases principales y en el desarrollo de cada fase se han obtenido los siguientes resultados:

Fase 1: Evaluación de la sostenibilidad

- El análisis del producto requiere, en cada caso, su descomposición en partes más simples, que pueden ser subsistemas, subconjuntos, piezas, componentes, materiales,... con objeto de conocer en detalle su constitución, sus características y especificaciones. El resultado de este análisis permite abordar el inventario de producción.
- Realizar el inventario de producción requiere obtener y organizar convenientemente los datos que caracterizan cada una de las operaciones del proceso productivo, analizar las transformaciones de material, el consumo de energía, la asignación de recursos, el tiempo empleado y el coste económico.
- El estudio completo y preciso de producto y proceso productivo permite identificar y seleccionar un conjunto de métricas ingenieriles significativas y evaluar los indicadores de sostenibilidad en cada una de sus dimensiones.
- Se ha trabajado con un conjunto común de métricas e indicadores en todos los casos. No obstante, se seleccionan en cada caso, los considerados más eficaces para desarrollar la metodología y lograr sus objetivos. Por otra parte, la selección de métricas e indicadores se podría ampliar con el objetivo de realizar un análisis y evaluación más completos y que sean adecuados a las particularidades del producto y a las estrategias aplicadas en el rediseño.

Fase 2: Rediseño de producto

- El rediseño se ha basado en la propuesta y selección de alternativas que cumplan las especificaciones convencionales del producto y apliquen estrategias que permitan reducir los focos de impacto.
- En cada caso de estudio, se han analizado especificaciones del producto. Para ello, como en la Fase 1, resulta imprescindible conocer en detalle su constitución y sus características (relacionadas con el uso y otras etapas del ciclo de vida).
- Se comprueba que para plantear estrategias de rediseño eficaces es necesario determinar cuáles son los factores que afectan de forma determinante a la sostenibilidad (focos de impacto).
- En el diseño inicial y en las diferentes alternativas de rediseño, los indicadores ambientales son evaluados considerando aquellas etapas del ciclo de vida que puedan verse comprometidas. De esta forma, se pretende plantear opciones de rediseño válidas y que no se vean rechazadas por no considerar este tipo de enfoque global (que también se ha tenido en cuenta en el análisis de especificaciones).

Fase 3: Comparación de diseños

- Se comprueba la idoneidad de las métricas e indicadores utilizados para comparar diseños y detectar si se han obtenido mejoras relativas.
- Esta última fase permite observar si se han logrado los objetivos de la metodología planteada.
- Estos objetivos se alcanzan tras un proceso secuencial y sistemático, en el que el desarrollo de cada fase está condicionado por la fase anterior:
 - Proyectar una mejora en la sostenibilidad de un producto supone aplicar estrategias adecuadas de diseño.
 - Plantear estrategias de rediseño sostenible efectivas conlleva la detección de los factores más influyentes.
 - Seleccionar una alternativa de rediseño implica comprobar que las especificaciones iniciales del producto se cumplen.
 - Medir la sostenibilidad requiere el análisis de inventario.
 - Abordar el inventario de producción requiere el análisis del producto.
- Se comprueba la apropiada secuenciación de fases para lograr el objetivo de obtener diseños mejorados.

La metodología ha sido aplicada a cuatro productos diferentes con los siguientes resultados:

Caso 1 - Seguidor solar		
<ul style="list-style-type: none"> El análisis del producto por componentes individuales resulta idóneo para la detección de focos de impacto y aplicación de estrategias de rediseño. Se ha proyectado un rediseño con una reducción en la masa del 59% (12,9 Kg) y en el volumen del 50% (0,024 m³). La energía consumida en el proceso de fabricación del producto rediseñado se reduce un 35,5% (233,5 Kw·s por unidad). El coste de materia prima se incrementa pero la reducción en los coste por consumos (energía y consumibles) permite reducir los costes de producción en un 15,5% (16,7 €). La producción puede aumentarse un 10,1%. 		
Dimensión ambiental	Dimensión económica	Dimensión social
<ul style="list-style-type: none"> El rediseño del producto permite reducir el impacto ambiental en: - GWP₁₀₀: 9 KgCO₂-eq - EI99: 5,72 pt. 	<ul style="list-style-type: none"> Mejoran los indicadores económicos asociados a la actividad productiva: - VA aumenta 16,7 € - EE aumenta 30,8 €/pt 	<ul style="list-style-type: none"> El rediseño del producto prevé una mejora en los indicadores sociales: - Tt disminuye 9,5% - Sh aumenta 6,5%

Caso 2 - Contenedor isoterma		
<ul style="list-style-type: none"> En este caso, resulta adecuado el análisis del producto por subconjuntos funcionales para obtener la distribución de impactos y aplicar estrategias de rediseño eficaces. Se ha proyectado un rediseño con una reducción de masa de 7,5% (6 Kg), una reducción en el consumo de energía en el proceso de fabricación de 4,5% (229,8 Kw·s por unidad) y una disminución de los costes de producción de 3,7% (11,5 €). La reducción de los costes de producción se debe a que los costes de adquisición de materia prima disminuyen. Las métricas de volumen de producto y porcentaje de residuos no varían. La producción puede aumentarse un 7,1%. 		
Dimensión ambiental	Dimensión económica	Dimensión social
<ul style="list-style-type: none"> El producto rediseñado reduce los indicadores ambientales en: - GWP₁₀₀: 59,9 KgCO₂-eq - EI99: 3,5 pt. 	<ul style="list-style-type: none"> El rediseño mejora los indicadores económicos de la actividad productiva - VA aumenta 11,5 € - EE aumenta 1 €/pt 	<ul style="list-style-type: none"> El rediseño del producto prevé una mejora de los indicadores sociales: - Tt disminuye 15,7% - Sh aumenta 18,4 %

Caso 3 - Aerógrafo

- Se ha realizado el análisis del producto por grupos de materiales y se han considerado diferentes factores para evaluar los focos de impacto.
- En este caso se aplica un proceso gradual de rediseño formado por dos iteraciones.
- En la primera iteración se obtienen reducciones significativas en el material desechado (13,2%), en la energía consumida (51%) y en los costes de producción (5,3%).
- En la segunda iteración se obtiene una reducción muy acusada en la masa del producto (62%, sin considerar el estuche), una reducción del consumo de energía (18,7%) y un aumento de los costes de producción (0,9%).
- En el diseño final proyectado, la producción puede aumentarse un 12% incorporando un trabajador más en el proceso.

Dimensión ambiental	Dimensión económica	Dimensión social
<ul style="list-style-type: none"> ▪ El rediseño del producto reduce los indicadores de impacto ambiental en: - GWP₁₀₀: 1,08 KgCO₂-eq - EI99: 346,4 pt. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Mejora global de VA y mejora progresiva de EE en cada iteración: - VA aumenta 2,7 € - EE aumenta 0,078 €/pt 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ En la producción del rediseño mejoran los indicadores sociales: - Tt disminuye 9% - Sh aumenta 22%

Caso 4 - Leche (unidad funcional: 1 litro)

- El análisis del producto se basa en la composición de nutrientes de la leche y en la alimentación necesaria para obtener esa composición.
- El proceso de rediseño conlleva una reducción en la masa total de alimento (26,6%).
- El volumen de agua no cambia y la masa de estiércol aumenta (6%).
- El cambio de alimentación (más ligera) y a la utilización de recursos adicionales (un trabajador más) permite reducir el consumo de energía (10,3%).
- Los costes de producción se incrementan (14,5%) debido a dos factores, el aumento de los costes de materia prima para alimentación y el de los costes de mano de obra.
- La producción diaria de leche en promedio es 1064 l.

Dimensión ambiental	Dimensión económica	Dimensión social
<ul style="list-style-type: none"> ▪ El rediseño reduce los indicadores de impacto ambiental en: - GWP₁₀₀: 0,14 KgCO₂-eq - Ac: 0,003 g SO₂-eq 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ El rediseño genera una disminución de los indicadores económicos: - VA disminuye 0,047 € - Rent disminuye 0,06 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ El rediseño permite mejorar los indicadores sociales: - Tt disminuye 15% - Sh aumenta 55%

4.2. Contribuciones de la tesis

Teniendo en cuenta que el marco teórico-práctico de la investigación se ha centrado en el proceso de diseño y desarrollo de producto, la realización de esta tesis supone las siguientes contribuciones:

1) Se ha planteado una metodología de desarrollo sostenible de producto que incorpora la sostenibilidad en sus tres dimensiones: ambiental, económica y social. La dimensión ambiental ya ha sido ampliamente aplicada en otros trabajos a través del Eco-diseño. Este trabajo contribuye a abordar el desafío de la sostenibilidad de una forma global e integradora. Para ello, analiza y avalúa los impactos en cada dimensión y aplica estrategias globales de mejora.

2) En la literatura científica, los estudios que abordan la sostenibilidad de producto se limitan a aplicar una metodología de evaluación. En muy pocos casos se aportan alternativas de rediseño, se proyectan soluciones, se evalúan y se comparan con el diseño inicial.

La metodología que se ha desarrollado además de evaluar la sostenibilidad tiene como objetivo mejorarla y para ello propone alternativas, proyecta el rediseño y lo analiza respecto al diseño inicial utilizando indicadores que evalúan las tres dimensiones.

3) Se han seleccionado y utilizado un conjunto de métricas e indicadores que facilitan el análisis del producto con una perspectiva ingenieril y permiten la evaluación cuantitativa de cada una de las dimensiones de la sostenibilidad en la fase de producción.

Teniendo en cuenta la diversidad de los casos objeto de estudio, se ha comprobado su idoneidad para sintetizar información, medir y comparar los aspectos esenciales que expresan la sostenibilidad del producto en esta etapa del ciclo de vida y proporcionar al diseñador los suficientes elementos para la toma de decisión.

4) La tesis muestra cómo la sostenibilidad puede ser incluida en proyectos de desarrollo de producto, lo que puede ser utilizado desde un punto de vista académico y desde un punto de vista profesional y empresarial. Se han realizado dos proyectos de carácter académico y dos proyectos que se basan en una actividad empresarial efectiva. Además, en uno de estos proyectos (explotación láctea), el rediseño ha sido puesto en práctica, comprobando los resultados de las estrategias planteadas.

5) El desarrollo de este trabajo contribuye a integrar los requerimientos de sostenibilidad en la metodología proyectual propia de la ingeniería y dentro del ámbito del diseño de producto. Para ello, se identifican especificaciones, se analizan factores y se proponen alternativas de diseño y se relacionan con herramientas para evaluar y mejorar la sostenibilidad.

Esto se realiza aplicando un planteamiento metodológico organizado en diferentes tareas y subtareas de acuerdo con un orden lógico.

6) La metodología ha sido puesta en práctica en diversos casos de estudio reforzando la validez del esquema metodológico planteado. En cada caso de estudio, las etapas se desarrollan de manera sistemática. Se realiza el estudio detallado del producto y de su proceso productivo, se obtiene el inventario completo a través del cálculo de parámetros característicos del proceso o bien a través de las correspondientes mediciones en el proceso productivo real, se evalúa la sostenibilidad y se detectan los factores de mayor impacto. Se proyecta y evalúa el rediseño y finalmente, se compara con el diseño inicial.

7) Los proyectos de rediseño realizados en el trabajo de tesis, revelan la necesidad de adecuar la evaluación y análisis de la sostenibilidad al tipo y características del producto, en particular, a la hora de determinar la distribución de factores de impacto.

La determinación de estos focos y de su impacto relativo, es crítico para establecer estrategias de rediseño de producto apropiadas:

- En el primer caso (seguidor solar), se rediseña cada componente individual del seguidor, ya que el análisis de impactos revela una contribución significativa de cada uno de ellos.
- En el segundo caso (contenedor isoterma), el rediseño se centra en el aislamiento térmico, puesto que el análisis de materiales utilizados en la fabricación muestra un elevado impacto ambiental y socio-económico.
- En el tercer caso (aerógrafo), el rediseño se realiza en dos ciclos, aplicando en cada ciclo estrategias de mejora frente a los factores de mayor impacto relativo.
- En el último caso (leche), el rediseño se basa en el cambio de materia prima utilizada en la alimentación ya que ésta es un foco importante de impacto.

8) La sostenibilidad es un concepto amplio, en el que intervienen múltiples factores y que tiene diferentes interpretaciones. Esta tesis aborda este concepto y contribuye a su comprensión. Sostenible en muchos ámbitos empresariales e industriales se asocia a ecológico o se vincula a los aspectos económicos que se exponen con preferencia en las memorias de sostenibilidad. Esta tesis contribuye a que el concepto de sostenibilidad se pueda incorporar al proceso de diseño de producto y al desarrollo de innovaciones que puedan ser aplicadas en el sector industrial. Permite comprobar la interconexión entre las tres dimensiones, trabajando con parámetros medibles y analizando factores específicos.

4.3. Trabajo de investigación futuro

El trabajo de investigación desarrollado ha permitido obtener resultados y realizar una serie de contribuciones, pero también se generan nuevas preguntas y se abren nuevas vías de trabajo. Aquí se recogen algunas de las posibles líneas de estudio que pueden continuarse tras este trabajo de tesis.

- 1) Una primera línea de investigación se centraría en ampliar los límites del sistema establecidos en este trabajo y ampliar la aplicación de la metodología a otras etapas del ciclo de vida del producto y a todo el ciclo en su conjunto. El marco de trabajo LCSA analiza y evalúa la sostenibilidad del ciclo de vida a través de la combinación de tres técnicas que se refieren a cada una de las dimensiones de la sostenibilidad. Este marco de trabajo podría ser utilizado para el planteamiento de una metodología que proyecte el producto contemplando todo su ciclo de vida. Se considera que los resultados obtenidos en esta tesis permiten abordar este desafío, ampliando progresivamente los límites del sistema analizado. Para ello, uno de los aspectos críticos sería la definición y evaluación de métricas e indicadores apropiados que permitan analizar la sostenibilidad con un enfoque práctico y de esta manera detectar y valorar los focos de impacto y aplicar estrategias de rediseño eficaces.
- 2) La dimensión social de la sostenibilidad no es fácil de evaluar ni de cuantificar. En este trabajo, se han utilizado indicadores cuantitativos con los que es posible evaluar la sostenibilidad en cada uno de los casos proyectados. No obstante, se considera recomendable ampliar el número de indicadores utilizados y también abordar otras categorías de agentes sociales además de los trabajadores, para lograr una evaluación más amplia y detallada. Una posible línea de investigación futura podría estar dedicada a profundizar en el estudio social, analizando categorías y grupos de impacto, tipos de indicadores y su evaluación desde el punto de vista cuantitativo.
- 3) La integración de la sostenibilidad se ha centrado en procesos relacionados con el desarrollo de producto. El centro de atención se puede poner también en procesos asociados a servicios o de forma más completa en sistemas producto-servicio (PSS). Vezzoli et al., (2014) definen el Diseño para la sostenibilidad de PSS como el diseño del sistema de productos y servicios que juntos son capaces de satisfacer las demandas de los clientes, que se basan en el diseño de interacciones innovadores entre los agentes sociales y donde el interés económico busca además el beneficio medioambiental y socio-ético. El desarrollo de métodos y herramientas para el diseño sostenible de PSS es un ámbito que requiere investigación y es considerado como un tema de gran interés para una ampliación de la metodología planteada en este trabajo.

Referencias

- A/69/L.85, 2015. Proyecto de documento final de la cumbre de las Naciones Unidas para la aprobación de la agenda para el desarrollo después de 2015. Asamblea General.
- Adelle, C. and Pallemmaerts, M., 2009. Sustainable development indicators. An overview of relevant framework programme funded research and identification of further needs in view of EU and international activities. European Communities.
- Akao, Y., 1990. Quality function deployment. Cambridge, MA: Productivity Press.
- Alimentos y sus propiedades. Propiedades nutricionales de la leche entera de vaca.
Disponible en: <https://alimentos.org.es/leche-entera-vaca>
- Altshuller, G., & Shulyak, L. (1998). 40 principles: TRIZ keys to technical innovation. Worcester, MA: Technical Innovation Center.
- Andreasen, M.M. and Hein, L. (1987) Integrert Produktutvikling. Universitetsforlaget, Oslo.
- Andriankaja, H., Vallet, F., Le Duigou, J., Eynard, B., 2015. A method to ecodesign structural parts in the transport sector based on product life cycle management. Journal of Cleaner Production 94, 165-176.
- Ariza, R., Ramirez, R., Paterson, F., Secchi, M., Siro, J., Vigna, A., 2009. Proceso de diseño, fases para el desarrollo de productos. Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI).
- Azapagic, A. and Perdan, S., 2000. Indicators of sustainable development for industry: A general framework. Trans IChemE, Process Safety Environmental Protection, Part B, 78:4, 243-261.
- Azapagic, A. and Perdan, S., 2005b. An integrated sustainability decision-support framework – Part II: problem analysis. International Journal of Sustainable Development & World Ecology, 12:2, 112-131.

- Babaizadeh, H., Haghighi, N., Asadi, S., Broun, R., Riley, D., 2015. Life cycle assessment of exterior window shadings in resident buildings in different climate zones. *Building and environment* 90, 168-177.
- Benoit-Norris, C., Vickery-Niederman, G., Valdivia, S., Franze, J., Traverso, M., Citroth, A., Mazijn, B., 2011. Introducing the UNEP/SETAC methodological sheets for subcategories of social LCA. *International Journal of Life Cycle Assessment* 16, 682-690.
- Bermejo, R., Arto, I., Hoyos, D., Garmendia, E., 2010. Menos es más. Del desarrollo sostenible al decrecimiento sostenible. *Cuadernos de trabajo de Hegoa* 52.
- Bernier, E., Maréchal, F., Samson, R., 2013. Life cycle optimization of energy-intensive processes using eco-costs. *International Journal of Life Cycle Assessment* 18, 1747-1761.
- Boër, C.R., Pedrazzoli, P., Bettoni, A., Sorlini, M., 2013. Mass customization and sustainability. An assessment framework and industrial implementation. Springer-Verlag, London.
- Bortolini, M., Cascini, A., Gamberi, M., Mora, C., Regattieri, A., 2014. Sustainable design and life cycle assessment of an innovative multi-functional haymaking agricultural machinery. *Journal of Cleaner Production* 82, 23-36.
- Bovea, M.D. and Pérez-Belis, V., 2012. A taxonomy of eco-design tools for integrating environmental requirements into the product design process, *Journal of Cleaner Production* 20:1, 61-71.
- Brand, G., Braunschweig, A., Scheidegger, A., Schwank, O., 1998. Ecopoints 97 (CH) V2.03/ Ecopoints (Bewertung in Oekobilanzen mit der Methode der ökologischen Kn appheit Oekofaktoren 1997). BUWAL Schriftenreihe Umwelt Nr. 297.
- Brezet, J.C. and Van Hemel C.G., 1997. Ecodesign: a promising approach to sustainable production and consumption. UNEP, United Nations Publications, Paris.
- Boër, C.R., Pedrazzoli, P., Bettoni, A., Sorlini, M., 2013. Mass Customization and Sustainability. An Assessment Framework and Industrial Implementation. Springer-Verlag, London.
- Capitano, C., Traverso, M., Rizzo, G., Finkbeiner, M., 2011. Life cycle sustainability assessment: an implementation to marble products. Life Cycle Management Conference, LCM, Berlin, Germany.
- Capuz, S., 1999. Introducción al Proyecto de producción. Ingeniería concurrente para el diseño de producto. Servicio de publicaciones de la Universidad Politécnica de Valencia, Valencia. España.
- Capuz, S., Gómez, T., Ferrer, P., Viñoles, R., Vivancos, J., Bastante, M., López, R., 2002. Ecodiseño: ingeniería del ciclo de vida para el desarrollo de productos sostenibles. Servicio de publicaciones de la Universidad Politécnica de Valencia, Valencia. España.
- Carson, R., 1962. Silent spring. Fawcett publications, inc., Greenwich conn.

- Cervantes, G., Sosa, R., Rodríguez, G. and Robles, F., 2009. Ecología industrial y desarrollo sostenible. *Ingeniería* 13:1, 63-70.
- Chang, Y., Sproesser, G., Neugebauer, S., Wolf, K., Scheumann, R., Pittner, A., Rethmeier, M., Finkbeiner, M., 2015. Environmental and social life cycle assessment of welding technologies. 12th Global Conference on Sustainable Manufacturing. *Procedia CIRP* 26, 293-298.
- Chobtang, J., Ledgard, S.F., McLaren, S.J., Donaghy, D.J., 2017. Life cycle environmental impacts of high and low intensification pasture-based milk production systems: A case study of the Waikato region, New Zealand. *Journal of Cleaner Production* 140, 664-674.
- Ciroth, A., Franze, J., 2011. LCA of an Ecolabeled Notebook. Consideration of Social and Environmental Impacts Along the Entire Life Cycle. GreenDelta TC GmbH, Berlin.
- Corbiere-Nicoller, T., Gfeller Laban, B., Lundquist, L., Leterrier, Y., Manson, J., Jolliet, O., 2001. Life cycle assessment of biofibres replacing glass fibres as reinforcement in plastics. *Resources, conservation and recycling* 33, 267-287.
- Cross, N., 1984. Engineering design methods, strategies for product design. John Wiley & Sons, Ltd.
- Crul, M. and Diehl, J. C., 2007. Diseño para la sostenibilidad. Un enfoque práctico para economías en desarrollo. United Nations Environment Programme (UNEP), Paris.
- Crul, M. and Diehl, J.C., 2009. Design for sustainability. A step-by-step approach. United Nations Environment Programme (UNEP), United Nations Publications, Paris.
- Dalal-Clayton, D.B. and Bass, S., 2002. Sustainable development strategies: A resource book. Earthscan publications Ltd., England.
- Del Pero, F., Delogu, M., Pierini, M., Bonaffini, D., 2015. Life cycle assessment of a heavy metro train. *Journal of Cleaner Production* 87, 787-799.
- Deubzer, F. and Lindemann, U., 2008. Functional modelling for design synthesis using MDM methodology. In: 10th International Design Structure Matrix Conference.
- Dewulf, W., 2003. A Proactive Approach to Ecodesign: Framework and Tools (PhD-thesis). Katholieke universiteit Leuven.
- Directiva 85/337/CEE del Consejo, de 27 de junio de 1985, relativa a la evaluación de las repercusiones de determinados proyectos públicos y privados sobre el medio ambiente.
- Directiva 97/11/CE del consejo, de 3 de marzo de 1997, por la que se modifica la Directiva 85/337/CEE relativa a la evaluación de las repercusiones de determinados proyectos públicos y privados sobre el medio ambiente.
- Dobón, A. 2009. Herramientas informáticas en ecodiseño. Jornada de ecodiseño en la industrial, Valencia.

- Dominique, B., Erkman, S., 2003. Perspectives on industrial ecology. *Ecological Economics* 49:1, 107-109.
- Durlinger, B., Koukouna, E., Broekema, R., van Paassen, M., Scholten, J., 2017. Agri-footprint 3.0 Gouda, NL.
- Dyllick, T. and Rost, Z., 2017. Towards true product sustainability. *Journal of Cleaner Production* 162, 346-360.
- Eatswood, M.D. and Haapala, K.R., 2015. A unit process model based methodology to assist product sustainability assessment during design for manufacturing. *Journal of Cleaner Production* 108, 54-64.
- Edwards, A. R., 2005. The sustainability revolution: portrait of a paradigm shift. Gabriola Island, BC: New Society.
- Elduque, D., Javierre, C., Pina, C., Martinez, E., Jimenez, E., 2014. Life cycle assessment of a domestic induction hob: electronic boards. *Journal of Cleaner Production* 76, 74-84.
- EN 12973, 2002. Value Management. European Standards.
- Estrategia Española de Desarrollo Sostenible (EEDS), 2007. Ministerio de la Presidencia. Catálogo general de publicaciones oficiales.
Disponible en: www.mapama.gob.es/es/ministerio/planes-estrategias/estrategia-espanola-desarrollo-sostenible/
- European Environment Agency (EEA) - Global and European Temperature, 2017. Disponible en: www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/global-and-european-temperature-4/assessment
- Fargnoli, M., De Minicis, M., Tronci, M., 2014. Design management for sustainability: an integrated approach for the development of sustainable products. *Journal of engineering and technology management* 34, 29-45.
- FAO - Portal lácteo, 2018. Disponible en: www.fao.org/dairy-production-products/es/
- FEDNA, 2010. Fundación Española para el Desarrollo de la Nutrición Animal. Disponible en: www.fundacionfedna.org/tablas-fedna-composicion-alimentos-valor-nutritivo
- Fiksel, J., McDaniel, J., Spitzley, D., 1998. Measuring product sustainability. *Journal of Sustainable Product Design* 6, 7-18.
- Finkbeiner, M., Schau, E.M., Lehmann, A., Traverso, M., 2010. Towards life cycle sustainability assessment. *Sustainability* 2, 3309 - 3322.
- Finnveden, G., Hauschild, M. Z., Ekvall, T., Guinée, J., Heijungs, R., Hellweg, S., Koehler, A., Pennington, D., Suh, S., 2009. Recent developments in life cycle assessment. *Journal of Environmental Management* 91, 1-21.

- Foolmaun, R. K., Ramjeawon, T., 2008. Life Cycle Assessment (LCA) of PET bottles and comparative LCA of the three disposal options in Mauritius. *International Journal Environment and Waste Management* 2: 1-2. 125-138.
- Fuentes, L., 2015. Diseño de un aerógrafo para trabajos de precisión. Trabajo fin de grado. Universidad de Zaragoza, Dpto. Ingeniería de Diseño y Fabricación.
- Gagnon, B., Leduc, R., Savard, L., 2012. From a conventional to a sustainable engineering design process: different shades of sustainability. *Journal of Engineering Design* 23:1, 49-74.
- Garner, A., Keoleian, G.A., 1995. Industrial ecology: An introduction. University of Michigan's National Pollution Prevention Center for Higher Education: Ann Arbor, MI.
- Global Reporting Initiative, (GRI). Disponible en: www.globalreporting.org
- Goedkoop, M. and Spriensma, R., 2000. The Eco-indicator 99. A damage oriented method for Life Cycle Impact Assessment. Methodology report. PRé Consultants B.V., Amersfoort, The Netherlands.
- Goedkoop, M., Heijunngs, R., Huijbregts, M., Schryver, A., Struijs, J., Van Zelm, R., 2013. ReCiPe 2008. A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level. PRé Consultants, Amersfoort, The Netherlands.
- Goedkoop, M., Oele, M., Schrywer, A., Vieira, M., 2014. Simapro Database Manual, Methods library. Pre.
- Graedel, T., Reaves, P., Sekutowski, J., 1995. Green product design. *AT&T Technical Journal*.
- Grupo Tatoma, Fabricación de maquinaria agrogranadera y equipamiento industrial. Disponible en: www.grupotatoma.com
- Guinée, J., Gorée, M., Heijungs, R., Huppes, G., Kleijn, R., de Koning, A., et al., 2001. Life cycle assessment - an operational guide to the ISO standards. Centre of Environmental Sciences (CML), Leiden University.
- Hauschild, M., Potting, J., 2005. Spatial differentiation in Life Cycle impact assessment – the EDIP2003 methodology. Institute for Product Development Technical University of Denmark.
- Hetherington, A.C., McManus, M.C., Gray, D.A., 2011. Comparison of allocation and impact assessment methodologies on the life cycle assessment of rape and sunflower seed oils. 5th International Conference in Life Cycle Management, Berlin, Germany.
- Hilty, L. and Aebischer, B., 2014. ICT for sustainability: An emerging research field. Springer International Publishing Swatzerland.
- Hopwood, B., Mellor, M. and O'Brien, G., 2005. Sustainable Development: Mapping different approaches. *Sustainable Development*, 13, 38-52.

- Horowitz, N., Frago, J., Mu, D., 2018. Life cycle assessment of bottled water: A case study of Green20 products. Waste Management (in press).
- Hospidio, A., Moreira, M., Feijoo, G., 2002. Simplified life cycle assessment of galician milk production. International dairy Journal 13, 783-796.
- Huijbregts MAJ, Steinmann ZJN, Elshout PMF, Stam G, Verones F, Vieira M, Hollander A, Zijp M, van Zelm R., 2016. ReCiPe 2016: a harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. Report I: Characterisation.
- Hunkeler, D., Rebitzer, G., Lichtenvort, K. (Eds.); Ciroth, A.; Hunkeler, D.; Huppes, G.; Lichtenvort, K.; Rebitzer, G.; Rüdenauer, I.; Steen, B. (Lead authors), 2008. Environmental Life Cycle Costing. SETAC Publications.
- IHOBE, S. A. Sociedad pública de gestión ambiental, 2000. Manual práctico de ecodiseño, operativa de implantación en 7 pasos. Gobierno Vasco.
- Ilg, R., 2013. Modeling complex aviation systems - the Eco-Design tool EcoSky. In: Bàrtolo et al. (Eds.). Green Design, Materials and Manufacturing Processes. Taylor & Francis Group, London, 293-296.
- Iritani, D., Silva, D., Saavedra, Y., Graef, P., Ometto, A., 2015. Sustainable strategies analysis through life cycle assessment: a case study in a furniture industry. Journal of Cleaner Production 96, 308-318.
- ISO, 2006a. ISO 14040 International Standard. In: Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework. International Organisation, Geneva, Switzerland.
- ISO, 2006b. ISO 14040 International Standard. In: Environmental management – Life cycle assessment – Requirements and Guidelines. International Organisation, Geneva, Switzerland.
- ISO 14042 International Standard. In: Environmental management – Life cycle assessment – Life cycle impact assessment. International Organisation, Geneva, Switzerland.
- ISO/TR 14062: 2002. Environmental management – Integrating environmental aspects into product design and development.
- ISO 26000:2010(es). Guía de Responsabilidad Social.
Disponible en: www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:26000:ed-1:v1:es
- Jones, E., Harrison, D., 2000. Investing the Use of TRIZ in Eco-innovation, TRIZCON 2000. Altshuller Institute.
- Kano, S., 2001. Life cycle and creation of attractive quality. In Proceedings of the 4th international quality management and organisational development conference. Linköping, Sweden.
- Karlsson, M., 1997. Green concurrent Engineering: Assuring Environmental Performance in Product Development. Dissertation. Lund University.

- Kemna, R., van Elburg, M., Li, W., van Holsteijn, R., 2005. MEEuP METHodology Report.
- Keoleian, G., Menerey, D., 1993. A life cycle approach to product system design. *Pollution Prevention Review* 3:3, 293-306.
- Keoleian, G., Menerey, D., 1993. Life Cycle Design Guidance Manual, EPA/600/R-92/226, Risk Reduction Engineering Laboratory, United States Environment Protection Agency.
- Kloepffer, W., 2008. Life cycle sustainability assessment of products (with comments by Helias A. Udo de Haes, p. 95). *International Journal of Life Cycle Assessment* 13:2, 89-95.
- Kuo, T.C., Huang, S.H. and Zhang, H.C., 2001. Design for manufacture and design for X: concepts, applications and perspectives. *Computers & Industrial Engineering* 41, 241-260.
- Kuo, T.C., Wu, H.H., 2003. Green products development by applying grey relational analysis and green quality function deployment. *International Journal of Fuzzy Systems* 5:4, 229-238.
- Lacasa, E., 2012. Diseño y fabricación de un seguidor solar de un eje. Proyecto final de carrera. Universidad de Zaragoza, Departamento de Ingeniería de Diseño y Fabricación.
- Lacasa, E., Santolaya, J.L., Biedermann, A., 2016. Obtaining sustainable production from the product design analysis. *Journal of Cleaner Production* 139, 706-716.
- Lagerstedt, J., Luttrupp, C., Lindfors, L.G., 2003. Functional priorities in LCA and design for environment. *International Journal of Life Cycle Assessment* 8:3, 160-166.
- Lamvik, T. (2001) Improving environmental performance of industrial products through product service systems. Doctoral dissertation. Norwegian University of Science and Technology.
- Leff, E., 2010. Globalización, ambiente y sustentabilidad (6ª ed.). Saber Ambiental, Siglo XXI Editores, México.
- Lehtinen, H., Saarentaus, A., Rouhiainen, J., Pitts, M., Azapagic, A. 2011. A review of LCA methods and tools and their suitability for SMEs. *Europe Innova*.
- Lippiatt, B.C., 2007. Building for environmental and economic sustainability (BEES). Technical manual and user guide. National Institute of Standards and Technology, U.S. Department of Commerce.
- Lofthouse, V., 2006. Ecodesign tools for designers: defining the requirements, *Journal of Cleaner Production* 14: 15-16, 1386-1395.
- Lowe, A. and Laurence, K., 1995. Industrial ecology and industrial ecosystems. *Journal of Cleaner Production* 3:1-2, 47-53.
- Lowenthal, M. and Kastenbergh, W., 1998. Industrial ecology and energy systems: a first step. *Resources, Conservation and Recycling*, 24, 51-63.
- Luttrupp, C. and Lagerstedt, J., 2006. Ecodesign and the ten golden rules: generic advice for merging environmental aspects into product development. *Journal of Cleaner Production* 14, 1396-1408.

- Malthus, T., 1798. An essay on the principle of population. J. Johnson, London.
- MAPAMA, 2018. Ministerio de Agricultura, Pesca, Alimentación y Medio Ambiente. Disponible en: www.mapama.gob.es/es/alimentacion/servicios/observatorio-de-precios-de-los-alimentos/estudios-e-informes/
- Martínez, E., Sanz, F., Pellegrini, S., Jiménez, S., Blanco, J., 2009. Life cycle assessment of a multi-megawatt wind turbine. *Renewable energy* 34, 667–673.
- Masrurroh, N., Klemes, B., 2006. Life cycle analysis of a solar thermal system with thermochemical storage process. *Renewable energy* 31, 537-548.
- Mathieux, F., Rebitzer, G., Ferrendier, S., Simon, M., Froelich, D., 2001. Ecodesign in the European Electr(on)ics Industry – An analysis of the current practices based on case studies. *The Journal of Sustainable Product Design* 1: 4, 233-245.
- Maxwell, D., Van der Vorst, R., 2003. Developing sustainable products and services. *Journal of Cleaner Production* 11, 883-895.
- Maxwell, D., Sheate, W., Van der Vorst, R., 2006. Functional and systems aspects of the sustainable product and service development approach for industry. *Journal of Cleaner Production* 14, 1466-1479.
- Meadows, D., Meadows, D., Randers, J., Behrens, W., 1972. The limits to growth. Universe Books.
- Menke, D., Davis, G., Vigon, B., 1996. Evaluation of life cycle assessment tools. The University of Tennessee, Center for Clean Products and Clean Technologies.
- Milton, A., Rodgers, P., 2013. Research methods for product design. London: Laurence King Publishing Ltd.
- Munari, B., 1983. ¿Cómo nacen los objetivos?. Editorial Gustavo Gili S.A.
- O'born, R., 2018. Life cycle assessment of large scale timber bridges: A case study from the world's longest timber bridge design in Norway. *Transportation Research Part D* 59, 301-312.
- Otto, K.N. and Wood, K.L., 1999. Product evolution: a reverse engineering and redesign methodology, *Journal of Research in engineering design*, Springer, New York.
- Pahl, G. and Beitz, W., 1996. Engineering Design. A systematic approach, Springer Verlag, Berlin.
- PNAS, 1992. Proceedings of the National Academy of Science of the United States of America. Disponible en: www.pnas.org/content/by/year/1992
- PROBAS Database. Disponible en: www.probas.umweltbundesamt.de/php/index.php
- Quantis, Ernst&Young, UTT, 2009. Disponible en: www.quantis-intl.com/waterdatabase/fr/index.php

- Rachuri, S., Sriram, R.D., Sarkar, P., 2009. Metrics, standards and industry best practices for sustainable manufacturing systems. In Proceedings of the 5th Annual IEEE Conference on Automation Science and Engineering, Bangalore, India.
- Ramírez, R., 2012. Guía de buenas prácticas de diseño. Herramientas para la gestión del diseño y desarrollo de productos. San Martín: Inst. Nacional de Tecnología Industrial – INTI.
- Real Decreto 1302/1986, de 28 de junio, de evaluación de impacto ambiental.
- Real Decreto 1131/1988, de 30 de septiembre, por el que se aprueba el reglamento para la ejecución del Real Decreto Legislativo 1302/1986, de 28 de junio, de evaluación de impacto ambiental.
- Real Decreto 1015/2013, de 20 de diciembre, por el que se modifican los anexos I, II y V de la Ley 42/2007, de 13 de diciembre, del Patrimonio Natural y de la Biodiversidad.
- Reginald, B., Khoo, H., 2005. Life cycle assessment of EPS and CPB inserts: design considerations and end of life scenarios. *Journal of environmental management* 74, 195-205.
- Ren, J., Manzardo, A., Mazzi, A., Zuliani, F., Scipioni, A., 2015. Priorization of bioethanol production pathways in China based on life cycle sustainability assessment and multicriteria decision-making. *International Journal Life Cycle Assessment* 20, 842-853.
- Ribeiro, I., Peças, P., Silva, A., Henriques, E., 2008. Life cycle engineering methodology applied to material selection, a fender case study. *Journal of Cleaner Production* 16, 1887-1899.
- Ritthoff, M., Rohn, H., et al., 2002. Calculating MIPS: Resource Productivity of Products and Services. Wuppertal Institute for Climate, Environment and Energy at the Science Centre North Rhine, Westphalia.
- Rockström, J., Steffen, W., Noone, K., Persson, A., Chapin, F. S., Lambin, E. , Lenton, T. M., Scheffer, M., Folke, C., Schellnhuber, H., Nykvist, B., De Wit, C. A., Hughes, T., Van der Leeuw, S., Rodhe, H., Sörlin, S., Snyder, P. K., Costanza, R., Svedin, U., Falkenmark, M., Karlberg, M., Corell, R. W., Fabry, V. J., Hansen, J., Walker, B., Liverman, D., Richardson, K., Crutzen P. and Foley, J., 2009. Planetary boundaries: Exploring the safe operating space for humanity. *Ecology and Society* 14:2, Art. 32.
- Roozenburg, N.F.M. and Eekels, J., 1995. Product design: fundamentals and methods. UK: Wiley.
- Rosal, G., 2011. Elaboración de metodología basada en la ergonomía de producto y ecodiseño aplicada al mobiliario escolar. Validación metodológica del producto. Tesis doctoral. Universidad de Oviedo, Departamento de diseño, construcción y fabricación en la ingeniería.
- Sachs, J., 2015. The age of sustainable development. Columbia University Press.
- Sakao, T., 2007. A QFD-centered design methodology for environmentally conscious product design. *International Journal of Production Research* 45, 4143-4162.

- Santolaria, M., Oliver-Sola, J., Gasol, C.M., Morales-Pinzon, T., Rieradevall, J., 2011. Eco-design in innovation driven companies: perception, predictions and the main drivers of integration. The Spanish example. *Journal of Cleaner Production* 19: 12, 1315-1323.
- Santolaya, J. L., Biedermann, A., Serrano, A., 2017. Using matrices of specifications, factors and concepts to assist design-engineering students. *International Journal of Technology and Design Education*.
- Schlüter, F., 2001. On the Integration of Environmental Aspects into Early Product Development – Life Cycle Design Structure Matrix. LicEng thesis, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.
- Siddiqui, O., Dincer, I., 2017. Comparative assessment of the environmental impacts of nuclear, wind and hydro-electric power plants in Ontario: a life cycle assessment. *Journal of Cleaner Production* 164, 848-860.
- Simon, H., 1982. *The sciences of the artificial*. MIT Press.
- Song, Q., Wang, Z., Li, J., Zeng, X., 2012. Life cycle assessment of TV sets in China: a case study of the impacts of CRT monitors. *Waste management* 32, 1926-1936.
- Stamatis, H., 1995. *Failure Mode and Effect Analysis: FMEA from Theory to Execution*. ASQC Quality Press, Milwaukee (WI), USA. Stanford University.
- Stigson, B., 1999. World Business Council for Sustainable Development (WBCSD). What is eco-efficiency? In Workshop “Eco-Efficiency”, pag. 2, Sidney, Australia.
- Stranddof, H., Hoffmann, L., Schmidt, L., 2005. Impact categories, normalization and weighting in LCA. Danish ministry of the environment.
- Telenko, C., Seepersad, C.C. and Webber, W.E., 2008. A compilation of design for the environment principles and guidelines. In: *ASME/IDETC/Design for Manufacturing and the Life Cycle Conference*, New-York.
- Tischner, U., Schmincke, E., et al., 2000. *How to Do Ecodesign? a Guide for Environmentally and Economically Sound Design*. German Federal Environmental Agency, Berlin.
- Traverso, M., Asdrubali, F., Francia, A., Finkbeiner, M., 2012. Towards life cycle sustainability assessment: an implementation to photovoltaic modules. *International Journal of Life Cycle Assessment* 17, 1068-1079.
- UBA, 2007. Umweltbundesamt (UBA). German Environmental Protection Agency.
- Ulrich, K., Eppinger, S., 2000. *Product design and development*. MacGraw-Hill.
- UNCED, 1992, Agenda 21, United Nations Conference on Environment and Development, Rio de Janeiro, June 1992.
- UNEP/SETAC, 2009. *Guidelines for Social Life Cycle Assessment of Products*. United Nations Environment Programme, Paris.

- UNEP/SETAC 2011. Towards a Life Cycle Sustainability Assessment. Making informed choices on products. United Nations Environment Programme, Paris.
- Valdivia, S., Ugaya, C.M.L., Hildenbrand, J., Traverso, M. Mazijn, B., Sonneman, G., 2013. A UNEP/SETAC approach towards a life cycle sustainability assessment-our contribution to Rio+20. *International Journal of Life Cycle Assessment* 18, 1673-1685.
- Van Hemel, C. and Cramer, J., 2002. Barriers and stimuli for eco-design in SMEs, *Journal of Cleaner Production* 10 439-453.
- VROM (Ministry of Housing, Spatial Planning and the Environment), 2000. Ecoindicator 99. Manual for Designers. A Damage Oriented Method for Life Cycle Impact Assessment. The Hague. The Netherlands.
- WCED (World Commission on Environment and Development), 1987. Our common future. Oxford University Press.
- Wenzel, H., Hauschild, M., Alting, L., 1997. *Environmental Assessment of Products, Vol 1: Methodology, Tools and Case Studies in Product Development*. Chapman & Hall, London.
- Wenzel, H., Hauschild, M.Z., 2001. *Environmental Assessment of Products, Methodology, Tools and Case Studies in Product Development*. Kluwer Academic Publishers.
- Wimmer, W. and Züst, R., 2003. *Ecodesign PILOT: product investigation, Learning and Optimization Tool for sustainable product development*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- Yassine, A.A., Chelst, K.R. and Falkenburg, D.R., 1999. A decision analytic framework for evaluating concurrent engineering. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 46:2, 144-157.
- Zabalza, I. 2010. Adaptación de la metodología del análisis de ciclo de vida para la evaluación y la mejora del impacto energético y ambiental de la edificación en España. Tesis Doctoral. Universidad de Zaragoza – Departamento de ingeniería mecánica.



Anexos

ANEXO C1 - Seguidor solar

Anexo C1 - 1. Análisis de alternativas de diseño

En este apartado se describen las operaciones de fabricación y se muestran los resultados del análisis de resistencia de cada uno de los componentes del seguidor solar. Se estudia el diseño inicial y las diferentes alternativas propuestas de rediseño.

En las siguientes Tablas se enumeran las operaciones de fabricación de cada componente y el cálculo de parámetros asociado. De acuerdo a las expresiones basadas en teoría de fabricación (Tabla AC1.1) en cada operación se calcula la potencia requerida y el tiempo empleado y se obtiene la energía consumida. Se estima la masa de material eliminado (viruta) y se calcula el desgaste de herramientas. Se ha tenido en cuenta el tiempo utilizado en operaciones no productivas (transporte, cambio de herramienta, etc.) y, en su caso, el consumo de energía en este tipo de operaciones. Además, se presentan los resultados de análisis de resistencia mecánica para cada componente y cada alternativa estudiada. El dispositivo debe soportar una placa de 2 m² y 20 Kg y las cargas externas debidas a diferentes agentes ambientales. Se muestran las fuerzas aplicadas, las condiciones de apoyo y finalmente, la distribución de tensiones obtenida tras el cálculo. Para realizar estos cálculos se ha empleado el software de diseño mecánico de Inventor.

Tabla AC1. 1. Cálculo teórico de parámetros en procesos de fabricación.

Proceso	P (Kw)	t (s)	V _{Dh} (g/min)
Corte con sierra K: Resistencia específica al corte (Pa); B: Espesor del diente (m); h: Altura del corte (m); V: Velocidad de avance (m/s); A: Sección de corte (mm ²); n: número de pasadas	$P = K \cdot B \cdot h \cdot V$	$t = \frac{h \cdot n \cdot 1000}{V}$	V _{Dh} = 900
Torneado A _c : Profundidad de corte (mm); V _c : Velocidad de corte (mm/min); p: Avance (mm/rev); F _c : Fuerza específica de corte (N/mm ²); η: Coef. de error; L: longitud de torneado (mm); φ: Diámetro (mm)	$P = \frac{A_c \cdot p \cdot V_c \cdot F_c}{60 \cdot 10^6 \cdot \eta}$	$t = \frac{L \cdot 60 \cdot \pi \cdot \phi}{V_c \cdot p}$	V _{Dh} = 0,5
Fresado F _c : resistencia del material (N/mm ²); L: longitud de fresado (mm); V _c : velocidad de corte (mm/min); d: ancho de fresado (mm); η: coeficiente de error;	$P = \frac{F_c \cdot L \cdot V_c \cdot d}{60 \cdot 10^3 \cdot \eta}$	$t = \frac{L \cdot 60}{V_c}$	V _{Dh} = 0,5
Taladrado F _c : resistencia del material (N/mm ²); p: avance (mm/rev); φ: diámetro (mm); V _c : velocidad de corte (mm/min); N: revoluciones de la broca (rpm); η: coeficiente de error L: profundidad (mm)	$P = \frac{F_c \cdot p \cdot \phi \cdot V_c}{4 \cdot 60 \cdot 10^3 \cdot \eta}$	$t = \frac{L \cdot 60}{p \cdot N}$	V _{Dh} = 0,5
Cizallado e: espesor de chapa (mm); l: longitud de corte (mm); F _c : resistencia del material (N/mm ²); V _c : velocidad de corte (mm/min); k: parámetro según tipo de trabajo; η: coeficiente de error	$P = \frac{e \cdot l \cdot F_c \cdot V_c \cdot k}{60 \cdot 10^6 \cdot \eta}$	t ≈ 1s	-
Doblado e: espesor de chapa (mm); l: longitud de plegado (mm); F _c : resistencia del material (N/mm ²); V _c : velocidad de corte (mm/s); k: parámetro según tipo de trabajo; wd: obertura en matriz (mm); η: coeficiente de error	$P = \frac{k \cdot l \cdot F_c \cdot e^2 \cdot V_c}{wd \cdot 60 \cdot 10^6 \cdot \eta}$	t ≈ 1s	-
Inyección C _s : calor específico material sólido (J/g·°C); C _t : calor específico material líquido (J/g·°C); T _m : temp. fusión (°C); T ₀ : temp. ambiente (°C); T _p : temp. vaciado (°C); ρ: densidad (g/cm ³); V: volumen iny. (cm ³); H _f : calor de fusión (J/g)	$H_1 = C_s \cdot (T_m - T_0)$ $H_2 = C_t \cdot (T_p - T_m)$ $P = \rho \cdot V \cdot (H_1 + H_2 + H_f)$	t _{iny} =120 t _{enfriam} =180	-

Tabla AC1.2. Seguidor solar - Proceso de fabricación del mástil.

(1) Mástil - Operaciones de fabricación		P _{op} (Kw)	t _{op} (s)	E _{op} (Kw·s)	M _{MD} (Kg·10 ⁻³)	D _h (Kg·10 ⁻³)
D inicial (D _i)	Materia prima: Perfil de sección rectangular (60x40x5mm), S275JR galvanizado, 6 m de longitud					
	1. Cortar a medida: longitud 1500 mm	0,26	4,5	1,16	6	1,13
	2. Taladrar, 2xAgujero de Ø8,5mm	0,26	14,66	3,86	9	0,20
	Operaciones no productivas	-	65	-	-	-
Altern. (A1)	Materia prima: Perfil de sección rectangular (60x30x4mm), AISI304N, 6 m de longitud					
	1. Cortar a medida: longitud 1200 mm	0,48	3,38	1,62	5	0,84
	2. Taladrar, 2xAgujero de Ø8,5mm	0,28	11,73	3,31	7	0,16
	Operaciones no productivas	-	65	-	-	-
Altern. (A2)	Materia prima: Perfil de sección rectangular (60x30x4mm), S275JR galvanizado, 6 m de longitud					
	1. Cortar a medida: longitud 1200 mm	0,26	3,38	0,87	5	0,84
	2. Taladrar, 2xAgujero de Ø8,5mm	0,26	11,73	3,09	7	0,16
	Operaciones no productivas	-	65	-	-	-
Altern. (A3)	Materia prima: Perfil de sección rectangular (60x40x5mm), Al 6066T4, 6 m de longitud					
	1. Cortar a medida: longitud 1200 mm	0,12	4,5	0,54	2	1,13
	2. Taladrar, 2xAgujero de Ø8,5mm	0,05	14,66	0,72	3	0,20
	Operaciones no productivas	-	65	-	-	-

Tabla AC1.3. Seguidor solar - Análisis de resistencia mecánica del mástil.

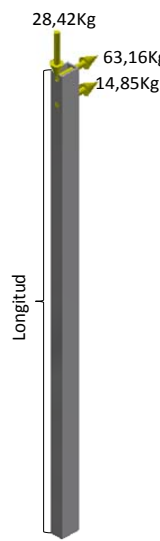
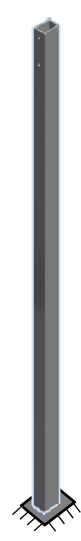
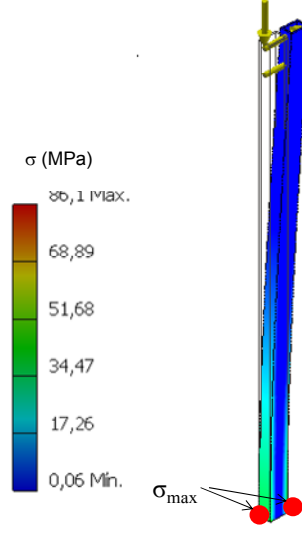
Cargas aplicadas		Condiciones de apoyo		Distribución de tensiones	
					
(1) Mástil	Material	Tipo de perfil (mm)		Longitud (mm)	σ _{max} (MPa)
D _i	S275JR g	60x40x5		1500	86,1
A1	AISI304N	60x30x4		1200	99,5
A2	S275JR g	60x30x4		1200	99,5
A3	Al 6066T4	60x40x5		1200	68,9

Tabla AC1.4. Seguidor solar - Proceso de fabricación de los brazos.

(2) Brazos - Operaciones de fabricación		P _{op} (Kw)	t _{op} (s)	E _{op} (Kw·s)	M _{MD} (Kg·10 ⁻³)	D _h (Kg·10 ⁻³)
Diseño inicial (D _i)	Materia prima: perfil rectangular (60x30x2mm) Al 6066T4, 6m de longitud					
	1. Cortar a medida: longitud 1050 mm	0,24	3,38	0,81	0,9	0,84
	2. Taladrar, 1xAgujero de Ø30,5mm	1,73	0,81	1,39	8	0,02
	3. Taladrar, 1xAgujero de Ø4,5mm	0,014	2,93	0,04	2	0,02
	4. Taladrar, 2xAgujero de Ø6,5mm	0,03	5,87	0,17	7	0,07
	Operaciones no productivas	-	85	-	-	-
Alternativa (A1)	Materia prima: perfil rectangular (40x30x1,5mm) AISI304N, 6m de longitud					
	1. Cortar a medida: longitud 1150 mm	0,96	2,25	2,16	1	0,56
	2. Taladrar, 1xAgujero de Ø30,5mm	3,75	2,20	8,25	1,7	0,04
	3. Taladrar, 1xAgujero de Ø4,5mm	0,08	2,20	0,18	0,4	0,01
	4. Taladrar, 2xAgujero de Ø6,5mm	0,17	4,40	0,75	2	0,06
	Operaciones no productivas	-	85	-	-	-
Alternativa (A2)	Materia prima: perfil rectangular (40x30x1,5mm) S275JR galvanizado, 6m de longitud					
	1. Cortar a medida: longitud 1150 mm	0,41	2,25	0,92	1	0,56
	2. Taladrar, 1xAgujero de Ø30,5mm	3,63	2,20	7,98	1,7	0,04
	3. Taladrar, 1xAgujero de Ø4,5mm	0,08	2,20	0,17	0,4	0,01
	4. Taladrar, 2xAgujero de Ø6,5mm	0,16	4,40	0,72	2	0,06
	Operaciones no productivas	-	85	-	-	-
Alternativa (A3)	Materia prima: perfil rectangular (50x30x2mm) de Al 6066T4, 6m de longitud					
	1. Cortar a medida: longitud 1150 mm	0,24	2,81	0,68	0,5	0,70
	2. Taladrar, 1xAgujero de Ø30,5mm	1,73	0,81	1,39	8	0,02
	3. Taladrar, 1xAgujero de Ø4,5mm	0,01	2,93	0,04	0,2	0,02
	4. Taladrar, 2xAgujero de Ø6,5mm	0,03	5,87	0,17	0,7	0,07
	Operaciones no productivas	-	85	-	-	-

Tabla AC1.5. Seguidor solar - Análisis de resistencia mecánica de los brazos.

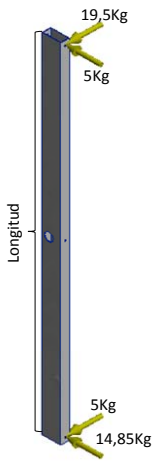

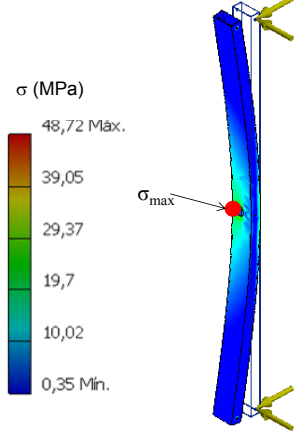
Cargas		Apoyos	Distribución de tensiones	
				
(2) Brazos	Material	Tipo de perfil (mm)	Longitud (mm)	σ _{max} (MPa)
D _i	Al 6066T4	60x30x2	1052	48,7
A1	AISI304N	40x30x1,5	1150	81,3
A2	S275JR Galv.	40x30x1,5	1150	81,3
A3	Al 6066T4	50x30x2	1150	61,9

Tabla AC1.6. Seguidor solar - Proceso de fabricación del eje.

(3) Eje - Operaciones de fabricación		P _{op} (Kw)	t _{op} (s)	E _{op} (Kw·s)	M _{MD} (Kg·10 ⁻³)	D _h (Kg·10 ⁻³)
Diseño inicial (D _i)	Materia prima: barra (Ø30 mm) S275JR galvanizado, 6 m de longitud					
	1. Cortar a medida: longitud 1150 mm	0,26	1,69	0,44	5	0,42
	2. Ranurar 2xRanura 2,6x3,2mm	0,94	0,60	0,57	2	0,01
	3. Ranurar 1xChavetero 130,5x6mm	0,08	6,12	0,47	0,04	0,05
	4. Taladrar 2xAgujero de Ø4mm	0,06	140,63	8,62	0,03	1,17
	Operaciones no productivas	0,03	87	0,06	-	-
Alternativa (A1)	Materia prima: tubo (Ø30x4mm) AISI304N, 6m de longitud					
	1. Cortar a medida: longitud 1000 mm	0,48	1,17	0,56	0,8	0,29
	2. Ranurar 2xRanura 2,6x3,2mm	0,57	0,65	0,37	1	0,01
	3. Ranurar 1xChavetero 130,5x6mm	0,08	6,12	0,46	0,04	0,05
	4. Taladrar 2xAgujero de Ø4mm	0,06	117,19	6,96	0,03	0,98
	Operaciones no productivas	0,03	87	0,06	-	-
Alternativa (A2)	Materia prima: tubo (Ø30x4mm) S275JR galvanizado, 6m de longitud					
	1. Cortar a medida: longitud 1000 mm	0,20	1,17	0,24	0,8	0,29
	2. Ranurar 2xRanura 2,6x3,2mm	0,78	0,49	0,38	1	0,004
	3. Ranurar 1xChavetero 130,5x6mm	0,08	6,12	0,47	0,04	0,05
	4. Taladrar 2xAgujero de Ø4mm	0,06	117,19	7,18	0,03	0,98
	Operaciones no productivas	0,03	87	0,06	-	-
Alternativa (A3)	Materia prima: barra (Ø30mm) Al 6066T4, 6m de longitud					
	1. Cortar a medida: longitud 1000 mm	0,12	1,69	0,20	0,8	0,42
	2. Ranurar 2xRanura 2,6x3,2mm	0,12	0,49	0,06	0,4	0,004
	3. Ranurar 1xChavetero 130,5x6mm	0,01	6,12	0,08	0,01	0,05
	4. Taladrar 2xAgujero de Ø4mm	0,01	117,19	1,21	0,01	0,98
	Operaciones no productivas	0,03	87	0,06	-	-

Tabla AC1.7. Seguidor solar - Análisis de resistencia mecánica del eje.



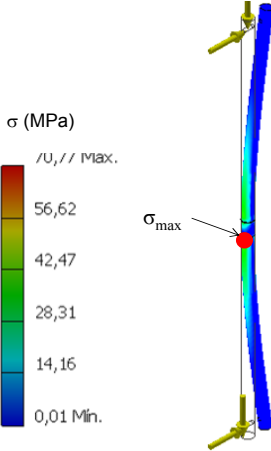
Cargas		Apoyos		Distribución de tensiones	
					
(3) Eje	Material	Tipo de sección (mm)		Longitud (mm)	σ _{max} (MPa)
D _i	S275JR g	Barra, Ø30		1150	70,7
A1	AISI304N	Tubo, Ø30x4		1000	96,6
A2	S275JR g	Tubo, Ø30x4		1000	96,6
A3	Al 6066T4	Barra, Ø30		1000	70,7

Tabla AC1.8. Seguidor solar - Proceso de fabricación de la carcasa.

(4) Carcasa - Operaciones de fabricación		P _{op} (Kw)	t _{op} (s)	E _{op} (Kw·s)	M _{MD} (Kg·10 ⁻³)	D _h (Kg·10 ⁻³)
Diseño inicial (D _i)	Materia prima: pellet PP 4062 para inyección em molde					
	1. Inyección carcasa 337,09cm ³	-	240	156,58	0	-
	2. Taladrar 2xAgujero de Ø30mm	86,86	2,68	116,34	1,2	0,20
	3. Taladrar 4xAgujero de Ø4mm	1,21	12,79	15,50	2	0,05
	4. Ranurar 2xRanura 10x10mm	15,16	3,38	25,56	1,4	0,02
	5. Cilindrar 1xCilindrado de Ø7mm	0,17	1,75	0,29	0,4	0,001
	6. Taladrar 4xAgujero de Ø3mm	1,36	3	4,09	0,4	0,01
	7. Roscar 4xRosado de Ø1mm	0,01	34,29	0,26	0	0,02
	8. Roscar 2xRosado de Ø2mm	0,01	18,75	0,10	0,02	0,01
	9. Taladrar 5xAgujero de Ø6mm	7,24	2,76	19,94	2	0,02
	Operaciones no productivas	0,29	479	2,33	-	-
Alternativa (A1)	Materia prima: pellet de PS 6055 para inyección en molde					
	1. Inyección carcasa 337,09cm ³	-	240	119,19	0	-
	2. Taladrar 2xAgujero de Ø30mm	86,86	2,68	116,34	1,4	0,02
	3. Taladrar 4xAgujero de Ø4mm	1,21	12,79	15,50	2	0,05
	4. Ranurar 2xRanura 10x10mm	15,16	3,38	25,56	1,4	0,01
	5. Cilindrar 1xCilindrado de Ø7mm	0,17	1,75	0,29	4	0,001
	6. Taladrar 4xAgujero de Ø3mm	1,36	3	4,09	0,5	0,01
	7. Roscar 4xRosado de Ø1mm	0,01	34,29	0,26	0	0,02
	8. Roscar 2xRosado de Ø2mm	0,01	18,75	0,10	0,02	0,01
	9. Taladrar 5xAgujero de Ø6mm	7,24	2,76	19,94	2	0,02
	Operaciones no productivas	0,29	479	2,33	-	-

Tabla AC1.9. Seguidor solar - Análisis de resistencia mecánica de la carcasa.



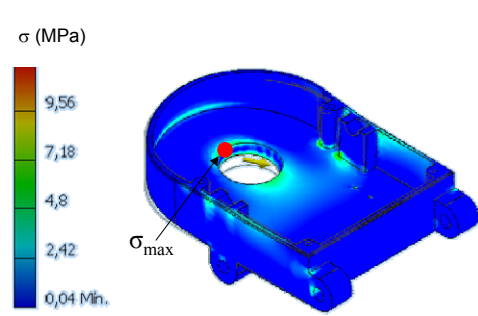
Cargas		Apoyos		Distribución de tensiones	
					
(4) Carcasa	Material	Materia prima		Volumen (mm ³)	σ _{max} (MPa)
D _i	PP 4062	Pellet		337,09	12
A1	PS 6055	Pellet		337,09	12

Tabla AC1.10. Seguidor solar - Proceso de fabricación del regulador.

(5) Regulador - Operaciones de fabricación		P _{op} (Kw)	t _{op} (s)	E _{op} (Kw·s)	M _{MD} (Kg·10 ⁻³)	D _h (Kg·10 ⁻³)
Diseño inicial (D _i)	Materia prima: chapa de 3mm de espesor, AISI 304N (1x1m)					
	1. Cortar, Long. 1150mm	0,17	1	0,17	0	-
	2. Cortar, Long. 320mm	0,05	1	0,05	0	-
	3. Cortar, Long. 371mm	0,05	1	0,05	50	-
	4. Taladrar 4xAgujero de Ø8,5mm	0,38	8,80	3,34	5	0,12
	5. Ranurar 2xRanura 116,2x4mm	6,63	36,31	240,67	20	0,15
	6. Doblar, Long. 115mm	0,0003	1	0,0003	0	-
	7. Doblar, Long. 115mm	0,0003	1	0,0003	0	-
Operaciones no productivas		-	105	-	-	-
Alternativa (A1)	Materia prima: chapa de 3mm de espesor, S275JR galvanizado (1x1m)					
	1. Cortar, Long. 1150mm	0,12	1	0,12	0	-
	2. Cortar, Long. 320mm	0,04	1	0,04	0	-
	3. Cortar, Long. 371mm	0,03	1	0,03	50	-
	4. Taladrar 4xAgujero de Ø8,5mm	0,26	8,80	2,32	5	0,12
	5. Ranurar 2xRanura 116,2x4mm	8,07	36,31	292,89	20	0,15
	6. Doblar, Long. 115mm	0,0003	1	0,0002	0	-
	7. Doblar, Long. 115mm	0,0003	1	0,0002	0	-
Operaciones no productivas		-	105	-	-	-
Alternativa (A2)	Materia prima: chapa de 4,5mm de espesor, Al 6066T4 (1x1m)					
	1. Cortar, Long. 1150mm	0,16	1	0,16	0	-
	2. Cortar, Long. 320mm	0,05	1	0,05	0	-
	3. Cortar, Long. 371mm	0,05	1	0,05	20	-
	4. Taladrar 4xAgujero de Ø8,5mm	0,05	13,20	0,65	3	0,18
	5. Ranurar 2xRanura 116,2x4mm	1,69	36,31	61,42	20	0,15
	6. Doblar, Long. 115mm	0,0005	1	0,0005	0	-
	7. Doblar, Long. 115mm	0,0005	1	0,0005	0	-
Operaciones no productivas		-	105	-	-	-

Tabla AC1.11. Seguidor solar - Análisis de resistencia mecánica del regulador.

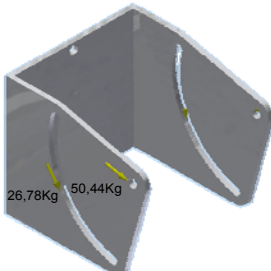
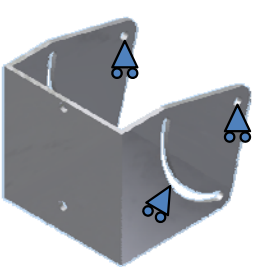
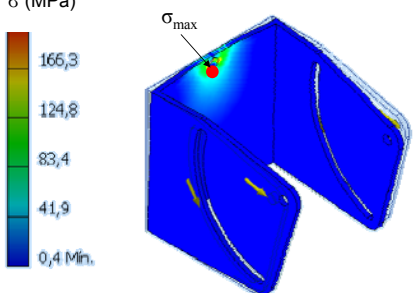
Cargas		Apoyos		Distribución de tensiones	
					
(5) Regulador	Material	Materia prima	Espesor (mm)	σ _{max} (MPa)	
D _i	AISI 304N	Chapa	3	114	
A1	S275JR g	Chapa	3	114	
A2	Al 6066T4	Chapa	4,5	62,2	

Tabla AC1.12. Seguidor solar - Proceso de fabricación del sinfín y de la corona.

(6) Sinfín - Operaciones de fabricación		P _{op} (Kw)	t _{op} (s)	E _{op} (Kw·s)	M _{MD} (Kg·10 ⁻³)	D _h (Kg·10 ⁻³)
Diseño inicial (Di)	Materia prima: barra (Ø20mm) Nylon 66/6, 6 m de longitud					
	1. Cortar longitud (105mm)	0,12	0,38	0,05	0,3	0,09
	2. Desbastar, 1x(Ø20 mm; prof.: 0,51 mm)	0,18	34,67	6,28	4	0,23
	3. Desbastar, 6x(Ø20 mm; prof.: 0,75 mm)	0,25	65,22	16,27	10	0,43
	4. Cilindrar, 2x(Ø10 mm; prof.: 0,5mm)	0,11	15,24	1,67	0,9	0,10
	5. Tallado dientes (dm=17,68 mm)	0,09	65,29	6,34	2	0,44
	6. Tallado dientes (dm=16,19mm)	0,07	13,06	0,88	0,2	0,09
	7. Ranurar, 5xRanura 14,5x3mm	0,02	13,59	0,24	0	0,05
Altern. (A1)	Operaciones no productivas	0,23	91	0,45	-	-
	Materia prima: pellet de PS 6055 para inyección en molde					
	1. Inyección 12,1cm ³	-	120	4,28	-	-
	2. Ranurar, 5xRanura 14,5x3mm	0,02	13,59	0,21	0	0,05
Altern. (A2)	Operaciones no productivas	-	225	-	-	-
	Materia prima: pellet de PP 4062 para inyección en molde					
	1. Inyección 12,1cm ³	-	120	5,62	-	-
	2. Ranurar, 5xRanura 14,5x3mm	0,02	13,59	0,21	0	0,05
	Operaciones no productivas	-	225	-	-	-
(7) Corona - Operaciones de fabricación		P _{op} (Kw)	t _{op} (s)	E _{op} (Kw·s)	M _{MD} (Kg·10 ⁻³)	D _h (Kg·10 ⁻³)
Diseño inicial (Di)	Materia prima: barra (Ø65mm) Nylon 66/6, 6 m de longitud					
	1. Cortar, longitud (7,9mm)	0,12	3,96	0,48	3	0,99
	2. Taladrar 1xAgujero Ø30mm	0,64	1,03	0,66	6	0,01
	3. Ranurar 1xRanura 17,7x7mm	1,18	2,20	2,59	0,003	0,04
	4. Tallado dientes (dm=10mm)	0,06	266,67	15,83	3	1,42
	5. Tallado dientes (dm=10mm)	0,04	26,67	0,99	0,02	0,14
Altern. (A1)	Operaciones no productivas	0,063	69	0,13	-	-
	Materia prima: pellet de PS 6055 para inyección en molde					
	1. Inyección 12,1cm ³	-	120	4,28	-	-
	2. Ranurar 1xRanura 17,7x7mm	1,18	2,20	2,59	0,003	0,04
Altern. (A2)	Operaciones no productivas	-	225	-	-	-
	Materia prima: pellet de PP 4062 para inyección en molde					
	1. Inyección 12,1cm ³	-	120	4,92	-	-
	2. Ranurar 1xRanura 17,7x7mm	1,18	2,20	2,59	0,002	0,04
	Operaciones no productivas	-	225	-	-	-

Tabla AC1.13. Seguidor solar - Análisis de resistencia mecánica de la transmisión.

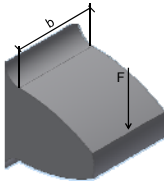
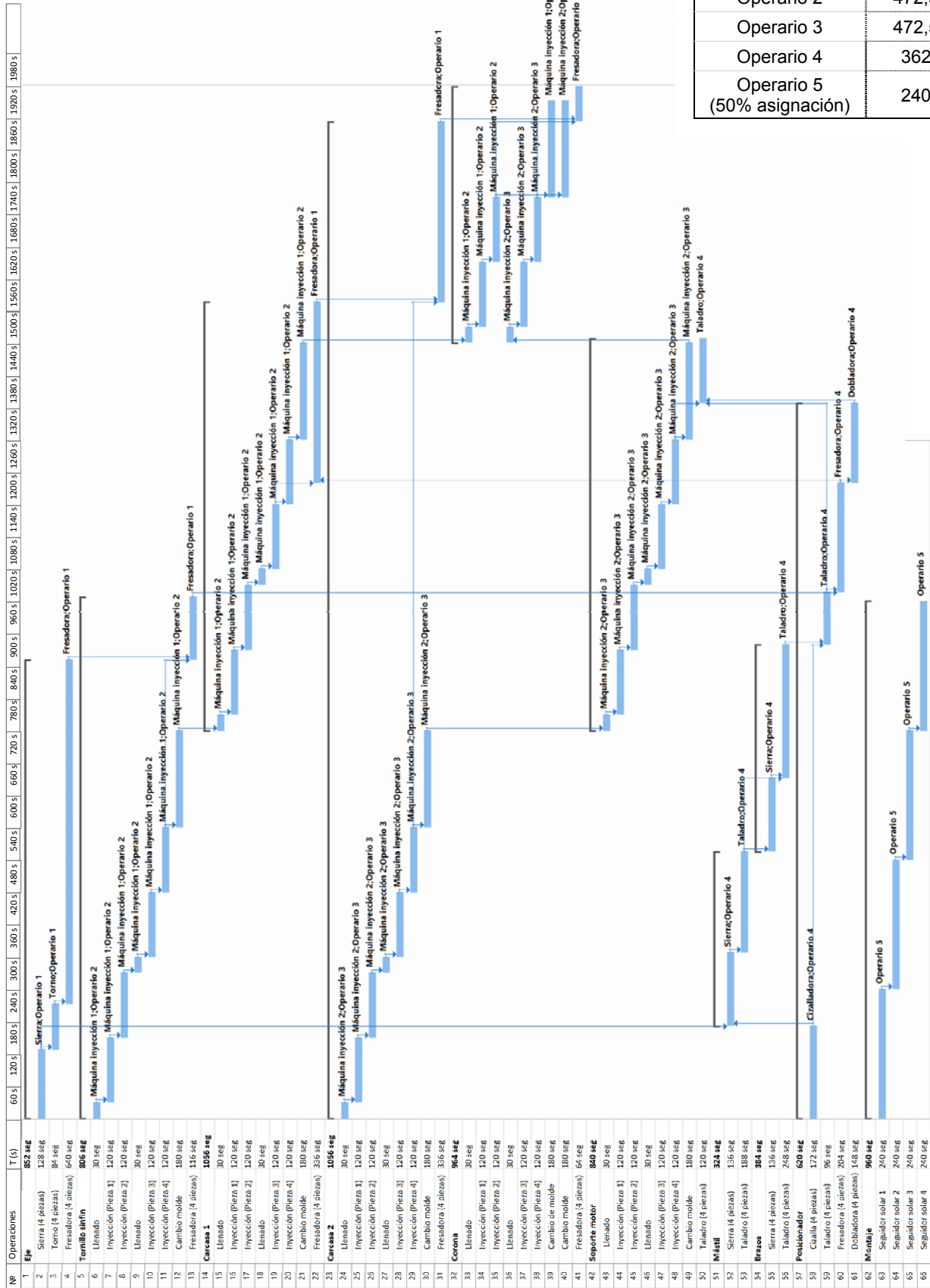
Datos		Condiciones de diente	Cálculo de la tensión	
M _{motor} = 190 Kp·mm D _p = 60 mm b = 5 mm M = 1,5 Z = 40 dientes y = 0,123 (factor de forma)			$M = \frac{2 \cdot M_{motor}}{D_p \cdot b \cdot \pi \cdot y \cdot \sigma} \rightarrow \sigma = 21,4 \text{ MPa}$	
Transmisión	D _i	A1	A2	σ _{max} (MPa)
	PA6	PS 6055	PP 4062	21,4

Tabla AC1.14. Seguidor solar - Proceso de fabricación del soporte.

(8) Soporte - Operaciones de fabricación		P _{op} (Kw)	t _{op} (s)	E _{op} (Kw·s)	M _{MD} (Kg·10 ⁻³)	D _h (Kg·10 ⁻³)
Diseño inicial (Di)	Materia prima: chapa de 1mm de espesor, S275JR (1x1m)					
	1. Cortar, longitud: 48mm	0,02	1	0,017	0	-
	2. Cortar, longitud: 82,2mm	0,003	1	0,002	0	-
	3. Taladrar, 5xAgujero Ø5mm	0,09	3,67	0,333	0,8	0,005
	4. Taladrar, 1xAgujero Ø29mm	3,06	0,73	2,245	5	0,01
	5. Doblar, Long.: 48mm	0,0001	1	0	0	-
	Operaciones no productivas	-	90	-	-	-
Alternativa (A1)	Materia prima: perfil "L" (70x15x1mm), Nylon 66/6, 6m de longitud					
	1. Cortar, longitud: 48mm	0,12	0,98	0,12	0,09	0,25
	2. Taladrar, 5xAgujero Ø5mm	0,08	3,67	0,29	0,1	0,005
	2. Taladrar, 1xAgujero Ø29mm	2,74	0,73	2,01	0,7	0,01
	Operaciones no productivas	-	70	-	-	-
Alternativa (A2)	Materia prima: pellet de PS 6055 para inyección en molde					
	1. Inyección 0,83cm ³	-	120	0,29	-	-
	2. Taladrar, 3xAgujero Ø5mm	0,08	3,67	0,29	0,1	0,005
	2. Taladrar, 1xAgujero Ø29mm	2,74	0,73	2,01	0,7	0,01
	Operaciones no productivas	-	250	-	-	-
Alternativa (A3)	Materia prima: pellet de PP 4062 para inyección en molde					
	1. Inyección 0,83cm ³	-	120	0,39	-	-
	2. Taladrar, 3xAgujero Ø5mm	0,09	3,67	0,33	0,09	0,005
	2. Taladrar, 1xAgujero Ø29mm	3,06	0,73	2,25	0,6	0,01
	Operaciones no productivas	-	250	-	-	-

Rediseño – Cronograma de operaciones



Trabajador	t _{trab} (s)
Operario 1	426
Operario 2	472,5
Operario 3	472,5
Operario 4	362
Operario 5 (50% asignación)	240

Anexo C1 - 3. Cálculo de indicadores ambientales

La obtención de indicadores ambientales se apoya en bases de datos existentes. En este caso se han utilizado los datos de Probas (UBA, 2007) y de la metodología MEEuP (Kemna et al., 2005). El99 fue obtenido del correspondiente manual para diseñadores (VROM, 2000). En la Tabla AC1.15, se enumeran los respectivos indicadores unitarios para cada una de las entradas del proceso y las bases de datos consultadas en cada caso. Se han calculado los siguientes indicadores ambientales: GE (Global Energy), GWP₁₀₀ (Global Warming Potential), Ac (Acidificación), El99 (Eco-indicador 99).

Tabla AC1.15. Seguidor solar - Indicadores ambientales unitarios.

Entrada	GE (MJ/Kg)	GWP ₁₀₀ (Kg CO ₂ -eq/Kg)	Ac (g SO ₂ -eq/Kg)	El99 (pt/Kg)	Base de datos
S275JR	10	0,9	0,42	300	Probas
AISI 304N	20,24	1,5	22,62	840	Probas
F-1100	8,03	0,61	0,38	170	Probas
Al 6066T4	26,68	1,86	0,47	60	Probas
Nylon 66/6	70,2	7,57	36,19	410	MEEuP
PP 4062	22,9	0,98	2,8	120	MEEuP
PS 6055	36,9	1,98	14,39	120	MEEuP
ABS	46,89	2,33	14,99	180	MEEuP
Metal duro	56,51	3,42	386,11	880	Probas
Cartón	0,48	0,035	0,182	30	Probas
Papel	74,94	0,546	2,35	30	Probas
Electricidad (Kw·h)	2,23	348,6	0,619	22000	Probas

A partir de los indicadores unitarios y de los datos obtenidos en el inventario de producción, se calculan los indicadores de impacto ambiental. El cálculo del impacto se puede dividir en dos bloques: materiales en el producto y proceso de fabricación. El bloque materiales en el producto considera la masa de cada material en el producto final e implica la evaluación del impacto teniendo en cuenta el proceso de obtención de ese material y el potencial de reciclaje en la etapa final de tratamiento. El bloque de proceso de fabricación incluye material desechado, energía y consumibles.

En las siguientes tablas se muestran los indicadores ambientales calculados en cada uno de estos bloques. En la Tabla AC1.16 los indicadores correspondientes al diseño inicial del seguidor y en la Tabla AC1.17, los obtenidos en el producto rediseñado. En el bloque de materiales en el producto, se desglosa por componentes y en el bloque proceso de fabricación, se hace el cálculo para cada material diferente. Se comprueba que la contribución al impacto de los materiales del producto es muy superior a la del proceso de fabricación y la propuesta de rediseño mejora todos los indicadores evaluados.

Tabla AC1.16. Seguidor solar - Indicadores ambientales del diseño inicial

Entrada	Material	Masa (Kg)	GE (MJ)	GWP ₁₀₀ (Kg CO ₂ eq)	Ac (g SO ₂ eq)	EI99 (mPt)
(1) Mástil	S275JR g	10,580	105,80	9,52	4,44	3174,0
(2) Brazos	Al 6066T4	1,970	52,83	3,68	0,93	118,8
(3) Eje	S275JR g	6,370	63,70	5,73	2,67	1911,0
(4) Carcasa	PP 4062	0,280	6,87	0,29	0,84	36,0
(5) Regulador	AISI 304N	0,940	19,03	1,41	21,25	789,6
(6) Sinfin	Nylon 66/6	0,020	1,40	0,15	0,72	8,2
(7) Corona	Nylon 66/6	0,017	1,19	0,13	0,62	6,9
(8) Soporte	S275JR	0,025	0,21	0,01	0,009	4,2
Tornillería	Varios	1,060	14,20	1,30	2,50	325,0
Embalaje	Varios	0,540	8,17	0,09	0,31	36,8
Materiales producto	Total		273,46	22,38	34,08	6411,4
Mat. desechado	S275JR g	0,028	0,26	0,023	0,012	7,62
Mat. desechado	Al 6066T4	0,009	0,24	0,017	0,004	0,54
Mat. desechado	PP 4062	0,018	0,41	0,018	0,050	2,16
Mat. desechado	AISI 304N	0,080	1,62	0,120	0	67,20
Mat. desechado	Nylon 66/6	0,029	2,04	0,219	1,049	11,89
Herramientas	Metal duro	0,009	0,48	0,029	3,309	7,54
Energía	0,18 Kw·h		0,0004	0,064	0	4,03
Proceso fabricación	Total		5,06	0,491	4,430	100,98
TOTAL			278,52	22,879	40,63	6512,38

Tabla AC1.17. Seguidor solar - Indicadores ambientales en el rediseño

Entrada	Material	Masa (Kg)	GE (MJ)	GWP ₁₀₀ (Kg CO ₂ eq)	Ac (g SO ₂ eq)	EI99 (mPt)
(1) Mástil	Al 6066T4	2,950	57,36	3,99	1,01	129,0
(2) Brazos	Al 6066T4	1,920	51,76	3,61	0,90	116,4
(3) Eje	Al 6066T4	1,940	51,23	3,57	0,89	115,2
(4) Carcasa	PP 4062	0,280	6,41	0,27	0,78	33,6
(5) Regulador	Al 6066T4	0,500	13,34	0,93	0,23	30,0
(6) Sinfin	PP 4062	0,011	0,28	0,01	0,03	1,44
(7) Corona	PP 4062	0,010	0,23	0,01	0,03	1,20
(8) Soporte	PP 4062	0,003	0,07	0,003	0,008	0,36
Tornillería	Varios	1,060	14,20	1,3	2,5	325
Embalaje	Varios	0,280	8,09	0,087	0,28	26,88
Materiales producto	Total		203,03	13,85	6,77	779,9
Mat. desechado	Al 6066T4	0,046	1,23	0,086	0,02	2,76
Mat. desechado	PP 4062	0,018	0,41	0,018	0,05	2,16
Herramientas	Metal duro	0,004	0,22	0,013	1,53	3,48
Energía	0,11 Kw·h		0,0003	0,039	0	2,49
Proceso fabricación	Total		1,86	0,156	1,59	10,88
TOTAL			204,89	14,009	8,36	790,76

Anexo C1 - 4. Costes de producción

Diseño inicial

Costes de materia prima (C_{MP})

Material	Tipo (mm)	Cant.	Ud.	Pr. (€/ud.)	Coste (€)
S275JR	Perfil hueco 60x40x5	1,5	m	8,91	13,37
Al 6066T4	Perfil hueco 60x30x2	2,1	m	4,8	10,09
S275JR	Barra, Ø30	1,15	m	6,53	7,50
PP 4062	Pellet	0,279	Kg	0,70	0,20
AISI 304N	Chapa, t=3	0,046	m ²	36,59	1,69
Nylon 66/6	Barra, Ø20	0,104	m	2,80	0,29
Nylon 66/6	Barra, Ø65	0,007	m	18,64	0,13
S275JR	Chapa, t=1	0,001	m ²	7,68	0,008
Tornillería/ Elementos comerciales					33,79
Total					67,1

Rediseño

Material	Tipo (mm)	Cant.	Ud.	Pr. (€/ud.)	Coste (€)
Al 6066T4	Perfil hueco 60x40x5	1,2	m	12,60	15,12
Al 6066T4	Perfil hueco 50x30x2	2,1	m	4,26	8,94
Al 6066T4	Barra, Ø30	1	m	9,89	9,89
PP 4062	Pellet	0,305	Kg	0,70	0,22
Al 6066T4	Chapa, t=4,5	0,046	m ²	19,14	0,68
Tornillería/ Elementos comerciales					33,79
Total					68,6

Costes por mano de obra (C_{MO})

Actividad	Nº	Coste/unidad (€)	Asignación (%)	Coste/unidad (€)
Taller	4	6,19	100	6,19
Taller	1	1,49	50	0,75
Almacén	1	1,47	100	1,47
Ingeniería	1	2,08	100	2,08
Gestión	1	1,82	100	1,82
Total				12,31

Producción: 6,9 unidades/h		
Actividad	Nº	S _h (€/h)
Taller	4	42,77
Taller	1	5,18
Almacén	1	10,16
Ingeniería	1	14,37
Gestión	1	15,58
		88,06

Producción: 7,6 unidades/h		
Actividad	Nº	S _h (€/h)
Taller	4	47,17
Taller	1	5,72
Almacén	1	11,20
Ingeniería	1	15,85
Gestión	1	13,87
Total		93,81

Costes por consumibles (C_{cons})

Coste/unidad de producto (€)	
Energía eléctrica	0,23
Consumibles máquina	19,98
Consumibles almacén	3,5
Total	23,71

Coste/unidad de producto (€)	
Energía eléctrica	0,19
Consumibles máquina	1,75
Consumibles almacén	3,5
Total	5,44

Costes indirectos (C_{ind})

Coste/unidad de producto (€)	
Alquileres	3,24
Impuestos	0,36
Limpieza-Mantenimiento	0,8
Total	4,4

Coste/unidad de producto (€)	
Alquileres	3,24
Impuestos	0,36
Limpieza-Mantenimiento	0,8
Total	4,4

Costes de amortización (C_{Am})

Coste/unidad de producto (€)	
Equipamiento	0,08
Instalaciones	0,13
Máquinas	0,55
Total	0,76

Coste/unidad de producto (€)	
Equipamiento	0,08
Instalaciones	0,13
Máquinas (+1 máquina de inyección)	0,61
Total	0,82

Máquina de inyección	
Coste estimado	15000 €
Periodo de amortización	20 años

COSTES DE PRODUCCIÓN (C_{Pr})

Diseño inicial	
Coste/unidad de producto (€)	
Materia prima	67,1
Mano de obra	12,31
Costes por consumo	23,71
Costes indirectos	4,41
Amortizaciones	0,76
TOTAL	108,3

Rediseño	
Coste/unidad de producto (€)	
Materia prima	68,6
Mano de obra	12,31
Costes de consumo	5,44
Costes indirectos	4,41
Amortizaciones	0,82
TOTAL	91,58

ANEXO C2 - Contenedor isoterma

Anexo C2 - 1. Listado de componentes y operaciones de fabricación

El contenedor isoterma se compone de 80 piezas diferentes que forman parte de 10 subconjuntos:

- Subconjunto 0.1 - Conjunto inyectado
- Subconjunto 0.2 - Puerta inyectada
- Subconjunto 0.3 - Bastidor inferior
- Subconjunto 0.4 - Bastidor superior
- Subconjunto 0.5 - Chapas techo bañera
- Subconjunto 0.6 - Mango
- Subconjunto 0.7 - Esquina puerta-eje
- Subconjunto 0.8 - Conjunto eje-puerta
- Subconjunto 0.9 - Gatillo
- Subconjunto 0.10 - Conjunto mango

A continuación se muestran cuáles son estos subconjuntos y se enumeran sus componentes. En las Tablas AC2.2 - AC2.12 se indican el tipo de materia prima empleada, las operaciones que intervienen en la fabricación de cada componente o, en su caso, si se trata de componentes comerciales adquiridos a otros proveedores. Se incluyen datos de tiempo empleado en la fabricación, energía consumida y material desechado.

El estudio se ha realizado con la colaboración de una empresa del Grupo Tatoma, situada en la Comunidad de Aragón, dedicada a la fabricación de equipamiento industrial (www.grupotatoma.com). En gran parte, el inventario de producción se ha obtenido a partir de los datos medidos en el propio proceso de fabricación y facilitados por la compañía fabricante. En algunos casos, donde no se pudieron recopilar datos del proceso, éstos han sido estimados a partir del análisis previo y cálculos teóricos. En la Tabla AC2.1 se indican de manera resumida los datos de tiempos, energía consumida y material desechado para cada uno de los subconjuntos que forman parte del producto.

Tabla AC2.1. Contenedor isoterma - Diseño inicial. Datos del proceso de fabricación.

Subconjunto	t_{subc} (s)	E_{subc} (Kw·s)	M_{MDsub} (Kg·10 ⁻³)
0.1 - Conjunto inyectado	492	717	55
0.2 - Puerta inyectada	1081	1060,5	73,5
0.3 - Bastidor inferior	886	1610,5	84,5
0.4 - Bastidor superior	987	1130	84
0.5 - Chapas techo bañera	168	62	5
0.6 - Mango	258	278	21
0.7 - Esquina puerta-eje	204	99	6
0.8 - Conjunto eje-puerta	311	59	4,5
0.9 - Gatillo	247	115,5	12
0.10 - Conjunto mango	201	70,1	4,5

Tabla AC2.2. Contenedor isoterma - Fabricación Conjunto.

Componente	Materia prima	Proceso de fabricación	t_{comp} (s)	E_{comp} (Kw·s)	M_{MDcomp} (Kg·10 ⁻³)
1. Tornillo DIN 7991	M12x40mm, Acero zincado	Comercial	-	-	-
2. Chapa eutéctica	Chapa 1,5mm, S275JR g	Corte (Láser)/Doblado	79,5	69,8	7
3. Chapa eutéctica SIM	Chapa 1,5mm, S275JR g	Corte (Láser)/Doblado	79,5	69,8	6
4. Vinilo	Vinilo	Comercial	-	-	-
5. Tuerca DIN 985	M12, Acero zincado	Comercial	-	-	-
6. Etiqueta adhesiva	-	Comercial	-	-	-
7. Tuerca freno DIN 985	M8, Acero zincado	Comercial	-	-	-
8. Vinilo de color	Vinilo 605x40mm	Comercial	-	-	-
9. Vinilo de color	Vinilo 605x40mm	Comercial	-	-	-
80. Arandela DIN 125	M12, Acero zincado	Comercial	-	-	-
0.1. Conjunto inyectado	Subconjunto	-	-	-	-
0.2. Puerta inyectada	Subconjunto	-	-	-	-
0.6. Mango	Subconjunto	-	-	-	-
0.7. Esquina puerta eje	Subconjunto	-	-	-	-
0.8. Conjunto eje puerta	Subconjunto	-	-	-	-
0.9. Gatillo	Subconjunto	-	-	-	-
0.10. Conjunto mango	Subconjunto	-	-	-	-
Aislante	Espuma de poliuretano	Inyección	10	160	-

Contenedor isoterma: Conjunto

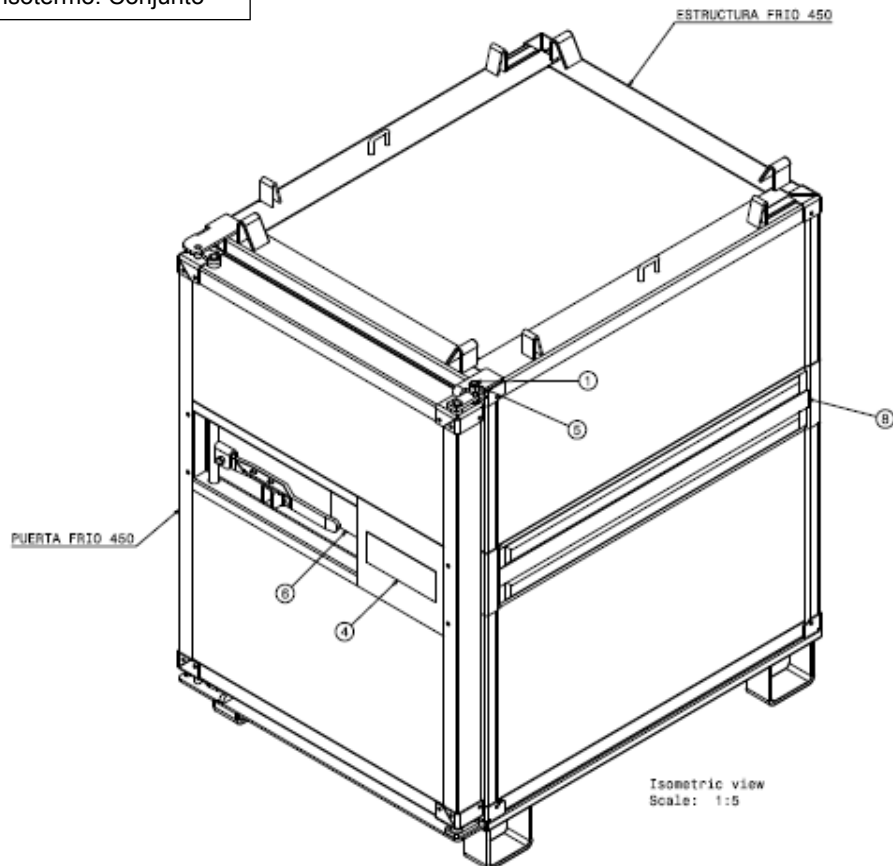


Tabla AC2.3. Contenedor isoterma - Fabricación del Subconjunto 0.1 - Conjunto inyectado.

Componente	Materia prima	Proceso de fabricación	t_{comp} (s)	E_{comp} (Kw·s)	M_{MDcomp} (Kg·10 ⁻³)
10. Angular cuerpo	Chapa 1.5mm, S275JR g	Corte (Láser)/Doblado	108	176,5	16
11. Angular cuerpo SIM	Chapa 1,5mm, S275JR g.	Corte (Láser)/Doblado	108	176,5	16
12. Trasera cuerpo	Chapa 2mm, HIPS	Comercial	-	-	-
13. Techo y suelo	Chapa 2mm, HIPS	Comercial	-	-	-
14. Lateral	Chapa 2mm, HIPS	Comercial	-	-	-
15. Chapa inferior 450	PS+FV	Comercial	-	-	-
16. Burlete gris	Extrusión L=944mm, Caucho	Comercial	-	-	-
17. Burlete gris	Extrusión L=702mm, Caucho	Comercial	-	-	-
18. Refuerzo trasero	Chapa 1,5mm, S275JR g	Corte (Láser)/Troquelado	79	81,5	7
19. Refuerzo lateral	Chapa 1,5mm, S275JR g.	Corte (Láser)/Troquelado	107	226	16
20. Remache	Tubo $\phi 6 \times 15$ mm, S275JR g	Comercial	-	-	-
21. Remache	Tubo $\phi 6 \times 22$ mm, S275JR g	Comercial	-	-	-
22. Taco espuma	40x60x60mm, Espuma PS	Comercial	-	-	-
0.3. Conjunto Bastidor inferior	Subconjunto	-	-	-	-
0.4. Conjunto Bastidor superior	Subconjunto	-	-	-	-
0.5. Conjunto chapas techo bañera	Subconjunto	-	-	-	-
Montaje	Soldadura	-	90	56,5	-

Subconjunto 0.1 - Conjunto inyectado

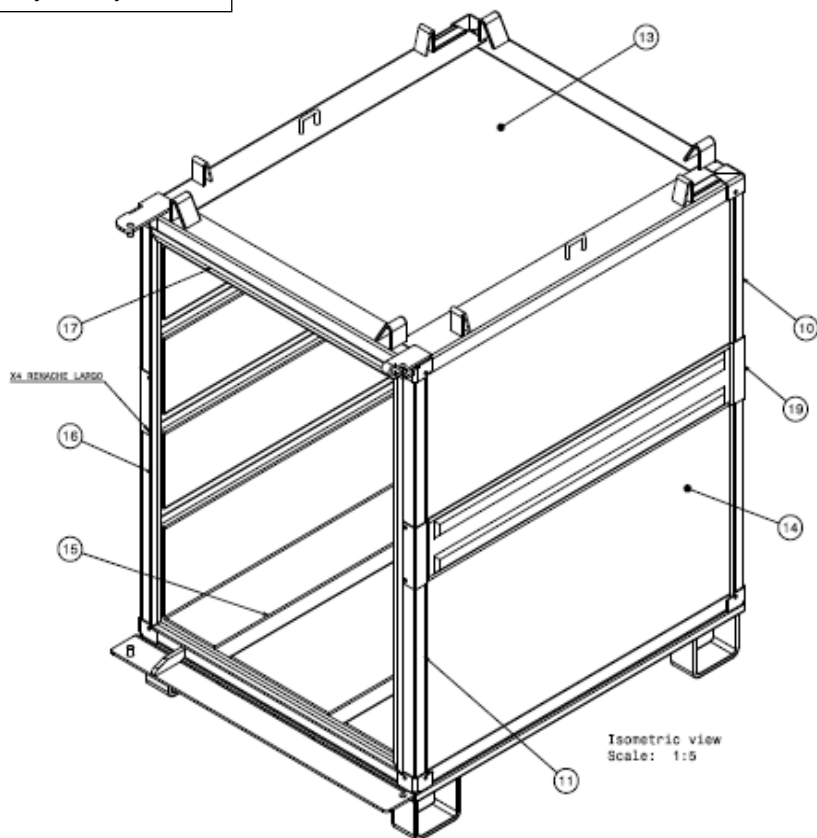


Tabla AC2.4. Contenedor isoterma - Fabricación del Subconjunto 0.2 - Puerta inyectada.

Componente	Materia prima	Proceso de fabricación	t_{comp} (s)	E_{comp} (Kw·s)	M_{MDcomp} (Kg·10 ⁻³)
20. Remache	Tubo $\phi 6 \times 15$ mm, S275JR g	Comercial	-	-	-
22. Taco espuma PS	40x60x60mm, Espuma PS	Comercial	-	-	-
43. Chapa inferior puerta	Chapa 1,5mm, S275JR g	Corte (Láser)/Doblado	79	71,7	6
44. Chapa lateral puerta	Chapa 1,5mm, S275JR g	Corte (Láser)/Doblado	83,5	90	8
45. Chapa lateral puerta SIM	Chapa 1,5mm, S275JR g	Corte (Láser)/Doblado	83,5	90	8
46. Chapa bandeja puerta	Chapa 1,5mm, S275JR g	Corte (Láser)/Doblado	82	90	10
47. Apoyo cierre mango	Chapa 4mm, S275JR g	Corte (Láser)/Doblado	70	35,2	4
48. Chapa superior puerta	Chapa 1,5mm, S275JR g	Corte (Láser)/Doblado	78	67	6
49. Chapa esquina puerta	Chapa 3mm, S275JR g	Corte (Láser)/Doblado	68	29	4
50. Chapa esquina puerta SIM	Chapa 3mm, S275JR g	Corte (Láser)/Doblado	68	29	4
51. Chapa gatillo SUP	Chapa 8mm, S275JR g	Corte (Láser)	52	27	6
52. Casquillo gatillo superior	Tubo $\phi 22 \times 3,75$ L=10mm,	Corte (Sierra)	46	0,2	1,5
53. Chapa eje puerta SUP	Chapa 8mm, S275JR g	Corte (Láser)	54,5	38	9
54. Casquillo eje puerta superior	Chapa 10mm, S275JR g	Corte (Sierra)	46	0,2	2
55. Chapa esquina puerta eje	Chapa 3mm, S275JR g	Corte (Láser)/Doblado	70,5	30,5	5
56. Plancha puerta exterior	Chapa 2mm, HIPS	Comercial	-	-	-
57. Plancha puerta interior	Chapa 2mm, HIPS	Comercial	-	-	-
58. Guía perfil ALAI	Perfil L=655mm, PVC Blanco	Comercial	-	-	-
59. Guía perfil ALAI	Perfil L=918mm, PVC Blanco	Comercial	-	-	-
60. Tornillo DIN 933	M8x25mm, Acero zincado	Comercial	-	-	-
61. Tuerca DIN 986	M8mm, Acero zincado	Comercial	-	-	-
62. Remache	Tubo $\phi 6 \times 10$ mm,	Comercial	-	-	-
Montaje	Soldadura	-	200	463	-

Subconjunto 0.2 - Puerta inyectada

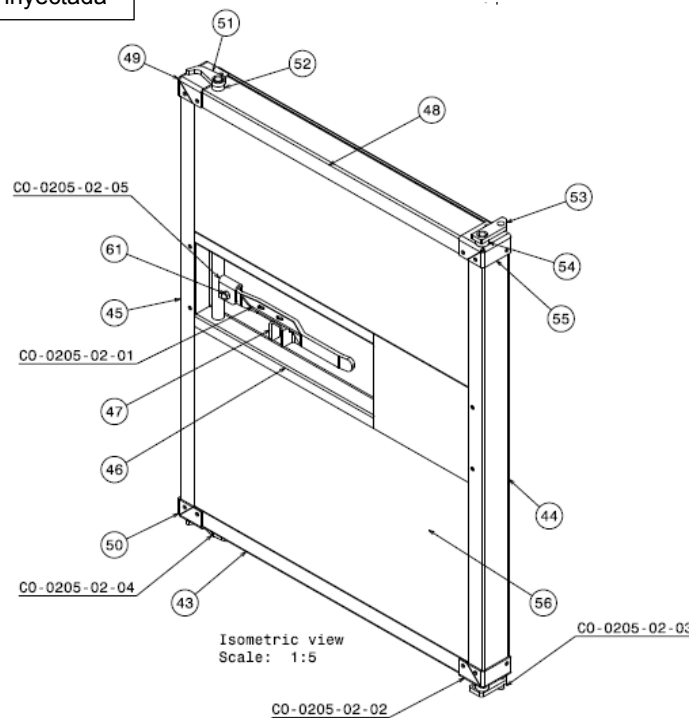


Tabla AC2.5. Contenedor isoterma - Fabricación del Subconjunto 0.3 - Bastidor inferior.

Componente	Materia prima	Proceso de fabricación	t_{comp} (s)	E_{comp} (Kw·s)	M_{MDcomp} (Kg·10 ⁻³)
23. Barra calibrada	Tubo $\phi 12$ L=20mm, S275JR g	Corte (Sierra)	45	0,07	0,5
24. Chapa angular largo base	Chapa 2mm, S275JR g	Corte (Láser)/Doblado	102,5	162,5	16
25. Chapa angular corto base	Chapa 2mm, S275JR g	Corte (Láser)/Dobladora	95,5	135	13
26. Chapa bordillo base	Chapa 5mm, S275JR g	Corte (Láser)/Dobladora	98,5	150	23
27. Chapa esquina base	Chapa 3mm, S275JR g	Corte (Láser)/Dobladora	83	75,5	10
28. Perfil PLF	Chapa 80x20x878x2mm, S275JR g	Corte (Sierra)	51	3	5,5
29. Perfil PLF	Chapa 80x20x734x2mm, S275JR g	Corte (Sierra)	51	3	5,5
30. Pletina	Chapa 60x8mm, S275JR g	Corte (Láser)/Dobladora	165	405,5	5
31. Chapa resbalón	Chapa 10mm, S275JR g	Corte (Láser)	55	444,5	6
Montaje	Soldadura	-	140	231,5	-

Subconjunto 0.3 – Bastidor inferior

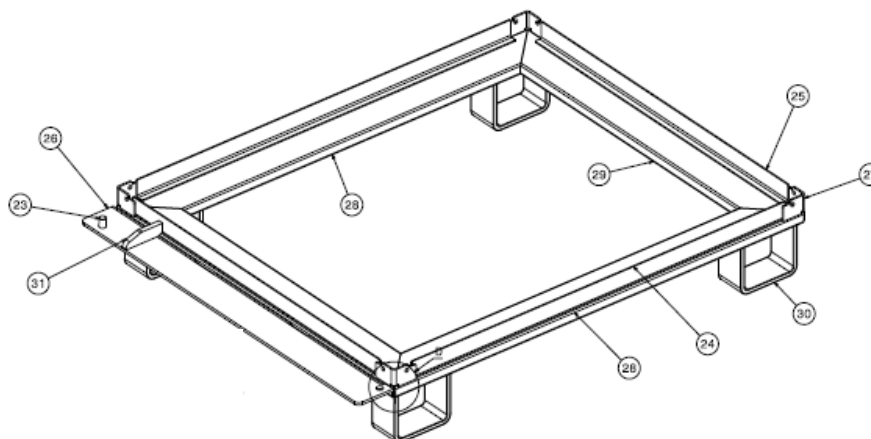


Tabla AC2.6. Contenedor isoterma - Fabricación del Subconjunto 0.4 - Bastidor superior.

Componente	Materia prima	Proceso de fabricación	t_{comp} (s)	E_{comp} (Kw·s)	M_{MDcomp} (Kg·10 ⁻³)
23. Barra calibrada	Tubo $\phi 12$ L=20mm, S275JR g	Corte (Sierra)	45	0,07	0,5
27. Chapa esquina base	Chapa 3mm, S275JR g	Corte (Láser)/Doblado	71,5	37,5	5
32. Ángulo largo superior	Chapa 2mm, S275JR g	Corte (Láser)/Doblado	106	175,5	17
33. Ángulo corto superior	Chapa 2mm, S275JR g	Corte (Láser)/Doblado	98	144	14
34. Esquina techo	Chapa 3mm, S275JR g	Corte (Láser)/Doblado	73	44	5
35. Chapa eje puerta	Chapa 6mm, S275JR g	Corte (Láser)/Doblado	72	45	9
36. Chapa eje gatillo	Chapa 6mm, S275JR g	Corte (Láser)/Doblado	61,5	42,5	7,5
37. Chapa carretilla	Chapa 4mm, S275JR g	Corte (Láser)/Doblado	84,5	82,5	10
38. Pletina	Chapa 40x5mm, S275JR g	Corte (Láser)/Doblado	88	96	13,5
39. Barra calibrada	Tubo $\phi 8$ L=20mm, S275JR g	Corte (Sierra)/Doblado	62	0,13	0,5
40. Pletina	Chapa 20x6x80mm, S275JR g	Corte (Sierra)	45,5	0,13	2
Montaje	Soldadura	-	180	463	-

Subconjunto 0.4 – Bastidor superior

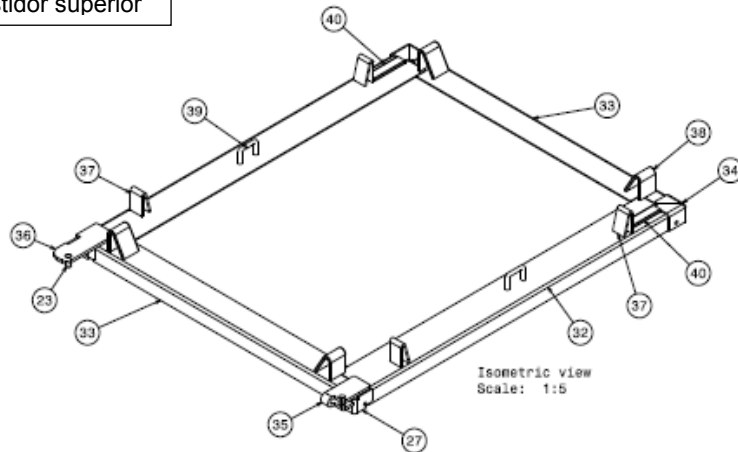


Tabla AC2.7. Contenedor isoterma - Fabricación del Subconjunto 0.5 - Chapas techo bañera.

Componente	Materia prima	Proceso de fabricación	t_{comp} (s)	E_{comp} (Kw·s)	M_{MDcomp} (Kg·10 ⁻³)
41. Chapa techo bañera	Chapa 1,5mm, S275JR g	Corte (Láser)	58	53,5	5
42. Tornillo DIN933	M8x16mm, Acero Galvanizado	Comercial	-	-	-
Montaje	Soldadura	-	110	8,6	-

Subconjunto 0.5 – Chapa techo bañera

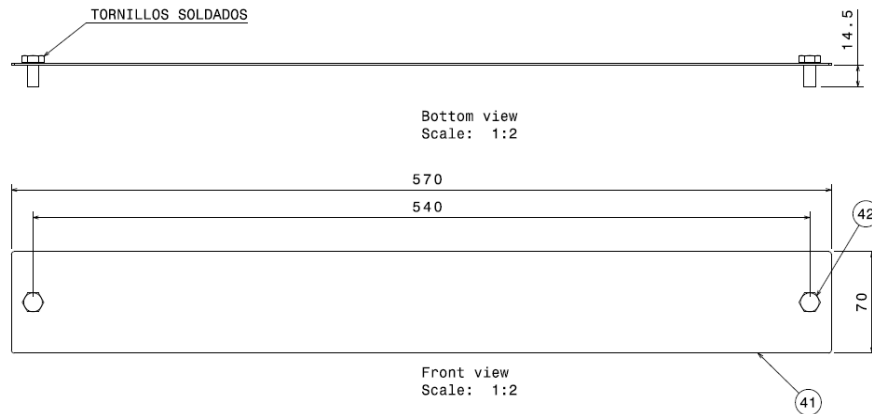


Tabla AC2.8. Contenedor isoterma - Fabricación del Subconjunto 0.6 - Mango.

Componente	Materia prima	Proceso de fabricación	t_{comp} (s)	E_{comp} (Kw·s)	M_{MDcomp} (Kg·10 ⁻³)
63. Chapa mango	Chapa 8mm, S275JR g	Corte (Láser)/Doblado	85,5	99	15
64. Chapa refuerzo mango	Chapa 4mm, S275JR g	Corte (Láser)	52,5	30	6
Montaje	Soldadura	-	120	149	-

Subconjunto 0.6 – Mango

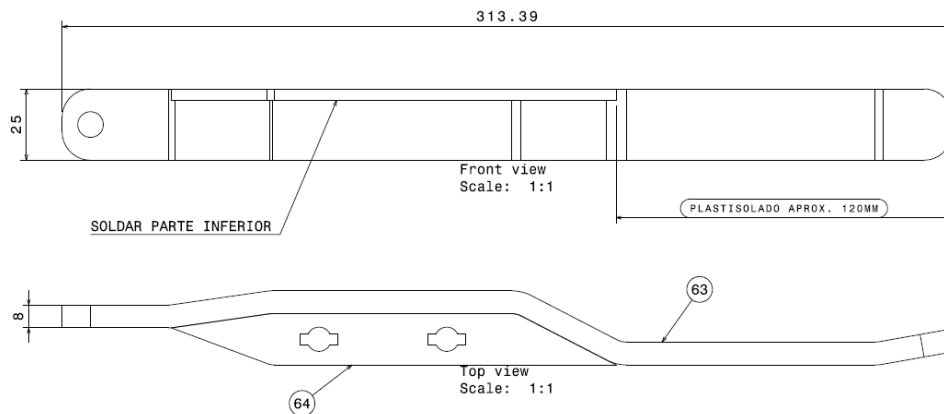


Tabla AC2.9. Contenedor isoterma - Fabricación del Subconjunto 0.7 - Esquina puerta eje.

Componente	Materia prima	Proceso de fabricación	t_{comp} (s)	E_{comp} (Kw·s)	M_{MDcomp} (Kg·10 ⁻³)
65. Chapa esquina puerta	Chapa 3mm, S275JR g	Corte (Láser)/Dobladora	69	32	5
66. Pletina	Chapa 30x8x14mm, S275JR g	Corte (Sierra)	45	32	1
Montaje	Soldadura	-	90	35	-

Subconjunto 0.7 – Esquina puerta eje

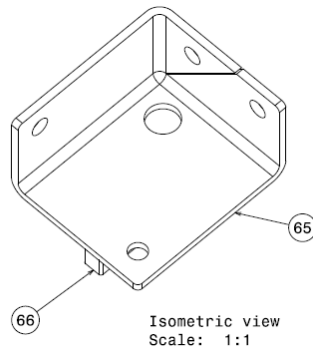


Tabla AC2.10. Contenedor isoterma - Fabricación del Subconjunto 0.8 - Conjunto eje puerta.

Componente	Materia prima	Proc. de fabricación	t_{comp} (s)	E_{comp} (Kw·s)	M_{MDcomp} (Kg·10 ⁻³)
23. Barra calibrada	Tubo $\phi 12$ L=20mm, S275JR g	Corte (Sierra)	45	0,07	0,8
67. Chapa eje puerta inferior	Chapa 8mm, S275JR g	Corte (Láser)	55,5	42	1
68. Barra calibrada	Tubo $\phi 12$ L=964mm, S275JR g	Corte (Sierra)	45	0,07	0,8
69. Casquillo eje puerta	Tubo $\phi 22 \times 4,75$ L=10mm, S275JR g	Corte (Sierra)	46	0,25	1,8
Montaje	Soldadura	-	120	16,5	-

Subconjunto 0.8 – Conjunto eje puerta

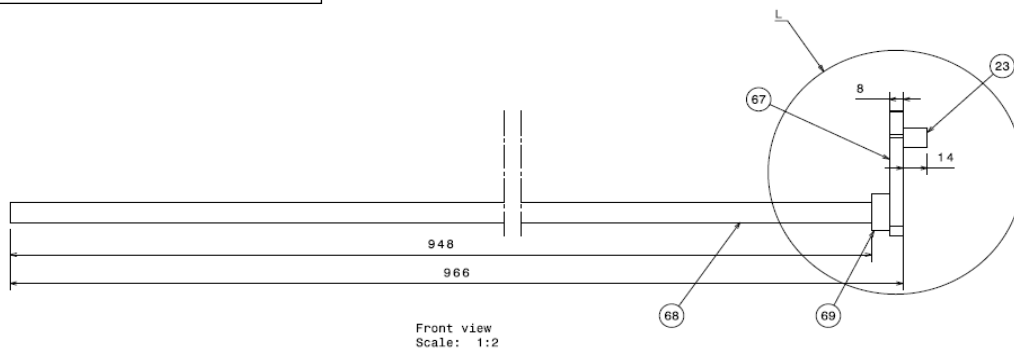


Tabla AC2.11. Contenedor isoterma - Fabricación del Subconjunto 0.9 - Gatillo.

Componente	Materia prima	Proc. de fabricación	t_{comp} (s)	E_{comp} (Kw·s)	M_{MDcomp} (Kg·10 ⁻³)
70. Chapa gatillo inferior	Chapa 8mm, S275JR g	Corte (Láser)	46	44	9,5
71. Barra calibrada	Tubo $\phi 14$ L=956mm, S275JR g	Corte (Sierra)	45,5	0,1	1
72. Casquillo gatillo	Tubo $\phi 22 \times 3,75$ L=10mm, S275JR g	Corte (Sierra)	45,5	0,1	1,5
Montaje	Soldadura	-	110	71,5	-

Subconjunto 0.9 – Gatillo

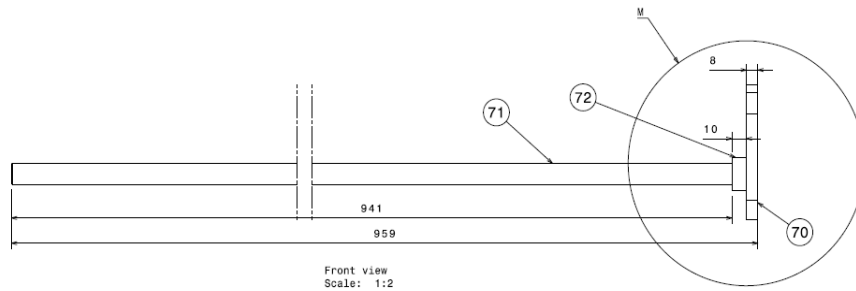
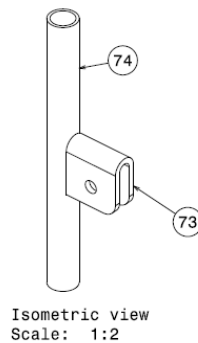


Tabla AC2.12. Contenedor isoterma - Fabricación del Subconjunto 0.10 - Conjunto mango.

Componente	Materia prima	Proc. de fabricación	t_{comp} (s)	E_{comp} (Kw·s)	M_{MDcomp} (Kg·10 ⁻³)
73. Chapa soporte mango	Chapa 4mm, S275JR g	Corte (Láser)/Doblado	66,5	22	3,5
74. Tubo calibrado	Tubo $\phi 20 \times 2$ L=200mm, S275JR g	Corte (Sierra)	45	0,1	0,8
Montaje	Soldadura	-	90	48	-

Subconjunto 0.10 – Conjunto mango



Anexo C2 - 2. Cálculo de indicadores

En este trabajo, el cálculo de indicadores ambientales se apoya en bases de datos existentes. En este caso se han utilizado los datos de Probas (**UBA, 2007**) y de la metodología MEEuP (**Kemna et al.,2005**). EI99 fue obtenido del correspondiente manual para diseñadores (**VROM, 2000**). En la Tabla AC2.13, se enumeran los respectivos indicadores unitarios para cada uno de los materiales y entradas que intervienen en el proceso productivo y las bases de datos consultadas en cada caso. En el caso de la fabricación del contenedor isoterma se utilizan en el análisis los siguientes indicadores ambientales: GE (Global Energy), GWP₁₀₀ (Global Warming Potential) y EI99 (Eco-indicador 99).

Tabla AC2.13. Contenedor isoterma - Indicadores ambientales unitarios.

Entrada	GE (MJ/Kg)	GWP ₁₀₀ (Kg CO ₂ -eq/Kg)	EI99 (pt/Kg)	Base de datos
S275JR	10	0,9	300	Probas
HIPS	42,4	1,98	120	MEEuP
PS	36,9	1,98	120	MEEuP
Fibra de vidrio	24,35	2,35	35	GlassFiber Europe, 2016
PUR	31,54	3,68	210	MEEuP
Caucho	79,83	0,18	120	Probas
PVC	6,8	1,18	100	MEEuP
AISI 304N	20,24	1,5	840	Probas
Al 6066-O	26,68	1,86	60	Probas
PP	22,9	1,17	120	MEEuP
PPO	30	1	120	MEEuP
Fibra de lino	6,12	0,28	30	Probas
LDPE	28	0,91	120	MEEuP
Metal duro	56,51	3,42	880	Probas
Electricidad (Kw·h)	2,23	348,6	22000	Probas

A partir de los indicadores unitarios y de los datos del inventario de fabricación del producto, se calculan los indicadores de impacto ambiental. Se establecen dos bloques: materiales en el producto y proceso de fabricación. En el primer bloque se calculan los indicadores correspondientes a la masa de los materiales que componen el producto final y en el segundo bloque se evalúan los indicadores ambientales por energía consumida, masa de material desechado durante la fabricación y utilización de consumibles.

En las Tablas AC2.14 y AC2.15, se resumen, para el diseño inicial y el rediseño, los indicadores calculados para una unidad de producto. En el caso de los materiales en el producto se hace un desglose por subsistemas. Se puede comprobar que la contribución al impacto ambiental de este bloque es muy superior a la del proceso de fabricación.

Tabla AC2.14. Contenedor isoterma - Diseño inicial. Indicadores ambientales

Entrada	Material	Masa (Kg)	GE (MJ)	GWP ₁₀₀ (Kg CO ₂ eq)	EI99 (Pt)
1) Bastidor	S275JR g	47,36	473,6	42,6	14,2
2) Pared exterior	HIPS	9,42	399,4	18,7	1,13
3) Pared interior	PS+FV	9,74	334,9	20	1
4) Aislamiento (aislante térmico)	PU	10,21	322,1	37,6	2,14
4) Aislamiento (separadores)	PS	0,023	0,78	0,03	2,76
5) Puerta (burlete)	Caucho	1,56	124,5	0,29	0,19
5) Puerta (guías)	PVC	0,22	1,49	0,26	0,02
Tornillería	Varios	0,07	0,70	0,06	0,021
Materiales producto	Total	1657,5	119,5	21,4	
Mat. desechado	S275JR g	0,48	4,8	0,43	0,14
Consumibles	Metal duro	0,003	0,16	0,009	0,003
Consumibles	Aporte sold.	0,27	2,7	0,24	0,09
Energía	1,5 Kw·h		0,003	0,49	0,03
Proceso fabricación	Total	7,7	1,18	0,26	
TOTAL			1665,2	120,7	21,7

Tabla AC2.15. Contenedor isoterma - Rediseño. Indicadores ambientales

Entrada	Material	Masa (Kg)	GE (MJ)	GWP ₁₀₀ (Kg CO ₂ eq)	EI99 (Pt)
1) Bastidor	S275JR g	45,17	451,7	40,7	13,4
2) Pared exterior	PP	8,57	196,3	10,1	0,51
3) Pared interior	LDPE+FL	8,08	180,9	5,9	0,82
4) Aislamiento (aislante térmico)	FL	9,19	56,2	2,57	0,27
4) Aislamiento (separadores)	PS	0,023	0,78	0,03	2,76
5) Puerta (burlete)	Caucho	1,56	124,5	0,29	0,02
5) Puerta (guías)	Caucho	0,17	13,6	0,03	0,19
Tornillería	Varios	0,07	0,70	0,06	0,021
Materiales producto	Total	1024,6	59,6	17,9	
Mat. desechado	S275JR g	0,46	4,6	0,43	0,14
Consumibles	Metal duro	0,003	0,16	0,009	0,003
Consumibles	Aporte sold.	0,27	2,7	0,24	0,09
Energía	1,4 Kw·h		0,003	0,44	0,03
Proceso fabricación	Total	7,06	1,13	0,24	
TOTAL			1031,7	60,8	18,2

Anexo C2 - 3. Costes de producción**Diseño inicial****Mediciones de materia prima**

S275JR - materia prima para bastidor	M _{MP} (Kg)
Chapa e=1,5 mm	17,44
Chapa e=2 mm	6,80
Chapa e=3 mm	1,42
Chapa e=4mm	0,55
Chapa e=5 mm	2,41
Chapa e=6 mm	0,55
Chapa e=8 mm	0,90
Chapa e=10 mm	0,19
Pletina 40x5 mm	0,69
Pletina 60x8 mm	4,49
Perfil 30x14x8 mm	0,03
Perfil 80x20x2mm	9,72
Perfil 80x20x6mm	0,15
Barra Ø6 mm	0,05
Barra Ø8 mm	0,08
Barra Ø10 mm	0,09
Barra Ø12 mm	0,89
Barra Ø14 mm	1,16
Tubo Ø20 x 2 mm	0,18
Tubo Ø22 x 3,75 mm	0,03
Tubo Ø22 x 4,75 mm	0,02

Rediseño

S275JR - materia prima para bastidor	M _{MP} (Kg)
Chapa e=1,5mm	17,44
Chapa e=2mm	6,80
Chapa e=3mm	2,87
Chapa e=4mm	0,55
Chapa e=6mm	0,93
Chapa e=8mm	0,40
Chapa e=10mm	0,19
Pletina 40x5mm	0,69
Pletina 60x8mm	4,49
Perfil 30x14x8mm	0,03
Perfil 80x20x2mm	9,72
Perfil 80x20x6mm	0,15
Barra Ø6mm	0,05
Barra Ø8mm	0,08
Barra Ø10mm	0,09
Barra Ø12mm	0,03
Tubo Ø12x2mm	0,47
Tubo Ø14x2mm	0,57
Tubo Ø20x2mm	0,18
Tubo Ø22x3,75mm	0,03
Tubo Ø22x4,75mm	0,02

Costes de materia prima (C_{MP})

Material	Tipo	Cant.	Ud.	Pr. (€/ud.)	C _{MPmat} (€)
S275JR g	Chapa/ Barra/ Tubo	47,84	Kg	1,79	85,65
HIPS	Plancha	9,42	Kg	1,30	12,25
PS+FV	Pieza inyectada	9,74	Kg	3,64	35,45
Isocianato +poliol	Líquido	7,5	l	14,52	108,9
PS	Espuma	0,023	Kg	1,2	0,03
Caucho	Perfil extruido	1,56	Kg	10	15,6
PVC	Perfil extruido	0,22	Kg	1,5	0,33
Tornillería/ Elementos comerciales					1,25
Total					259,5

Material	Tipo (mm)	Cant.	Ud.	Pr. (€/ud.)	C _{MPmat} (€)
S275JR g	Chapa/ Barra/ Tubo	45,59	Kg	1,79	81,61
PP	Plancha	8,57	Kg	1,2	10,28
LPDE+FL	Pieza inyectada	8,08	Kg	3,4	27,79
Fibra de lino	Plancha	9,19	Kg	12	110,28
PS	Espuma	0,023	Kg	1,2	0,03
Caucho	Perfil extruido	1,73	Kg	10	17,3
Tornillería/ Elementos comerciales					1,25
Total					248,5

Costes por mano de obra (C_{Mo})

Actividad	Nº	Coste/unidad (€)	Asignación (%)	Coste/unidad (€)
Taller	2	14,37	100	14,37
Almacén	1	6,86	100	6,86
Ingeniería	1	9,69	20	1,93
Gestión	1	8,48	20	1,69
Total				24,85

Producción: 1,2 unidades/h		
Actividad	Nº	S_h (€/h)
Taller	2	17,24
Almacén	1	8,23
Ingeniería	1	2,31
Gestión	1	2,02
		29,82

Producción: 1,42 unidades/h		
Actividad	Nº	S_h (€/h)
Taller	2	20,4
Almacén	1	9,74
Ingeniería	1	2,74
Gestión	1	2,4
Total		35,28

Costes por consumo (C_{cons})

Coste/unidad de producto (€)	
Energía eléctrica	0,19
Consumibles máquina	4,19
Total	4,38

Coste/unidad de producto (€)	
Energía eléctrica	0,15
Consumibles máquina	4,13
Total	4,28

Costes de amortización (C_{Am})

Coste/unidad de producto (€)	
Equipamiento	0,65
Instalaciones	0,30
Máquinas	1,25
Total	2,2

Coste/unidad de producto (€)	
Equipamiento	0,55
Instalaciones	0,25
Máquinas	1,01
Total	1,81

COSTES DE PRODUCCIÓN

Coste/unidad de producto (€)	
Materia prima	259,5
Mano de obra	24,85
Costes por consumo	4,38
Costes indirectos	2,11
Amortización	2,2
TOTAL	293

Coste/unidad de producto (€)	
Materia prima	248,5
Mano de obra	24,85
Costes de consumo	4,28
Costes indirectos	2,11
Amortización	1,81
TOTAL	281,5

ANEXO C3 - Aerógrafo

Anexo C3 - 1. Componentes y operaciones de fabricación

Todos los datos de mecanizado y fabricación de componentes se resumen en las Tablas AC3.1 - AC3.20. Para cada pieza, se enumeran las operaciones de proceso y parámetros característicos y se calcula el tiempo de mecanizado, el desgaste de herramientas y la energía consumida. El cálculo de tiempos se completa con la estimación de tiempos en operaciones no productivas.

El aerógrafo está formado por 29 piezas diferentes.

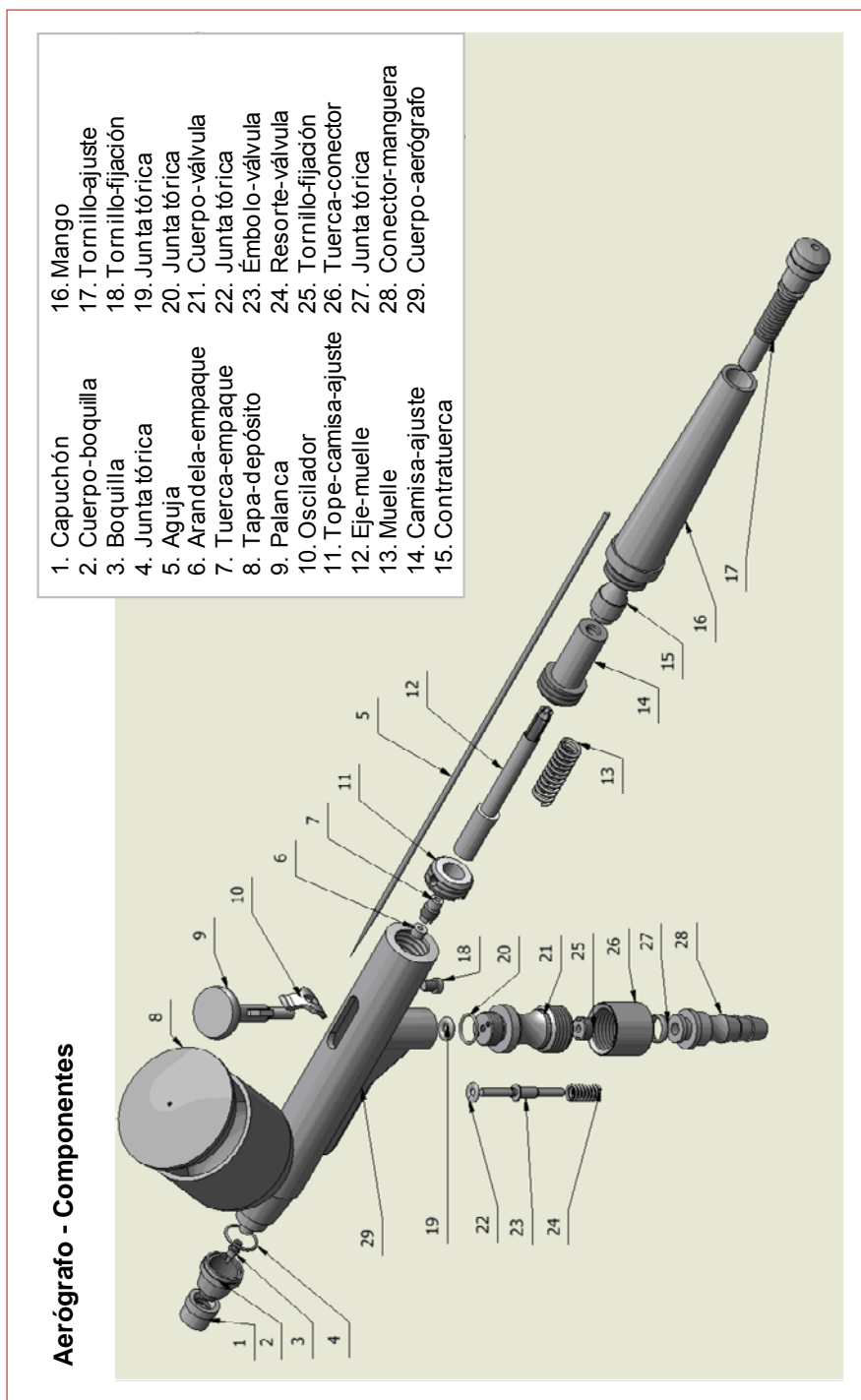
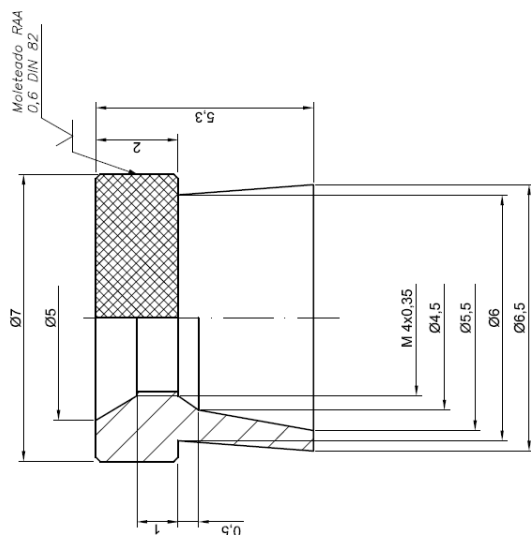
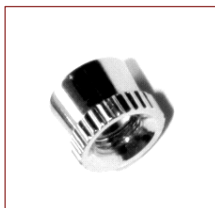


Tabla AC3.1

1. Capuchón de aguja



Consumos de energía

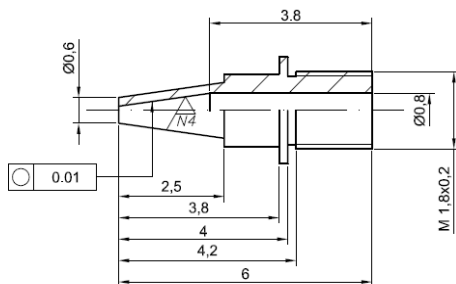
Máquina	Operación	Potencia (Kw)	Material (Kg)	T Prod (seg)	T Impród (s)	Desg. H. (gr)	Kw-seg
-	Transporte	-	-	-	20	-	-
Sierra	Cortar	0,18666667	0,00028	0,12	-	0,03	0,022400
-	Cambio maq.	-	-	-	15	-	-
Torno	Refrentar	0,050364	0,00080	1,33	-	0,01	0,067151
-	Cambio maq.	-	-	-	15	-	-
Taladro	Taladrado	0,029536	0,000530	7,95	-	0,07	0,234808
-	Cambio maq.	-	-	-	15	-	-
Torno	Conicidad	0,058965	0,00012	0,15	-	0,00	0,008735
-	Cambio Herr.	0,037000	-	-	3	-	0,111000
Torno	Moleteado	-	-	-	-	-	-
-	Cambio Herr.	0,037000	-	-	3	-	0,111000
Torno	Cilindrar	0,122922	0,000608	1,99	-	0,02	0,244088
-	Cambio maq.	-	-	-	15	-	-
Taladro	Escariado	0,004153	0,000088	4,95	-	0,0041	0,020560
-	Cambio maq.	-	-	-	15	-	-
Torno	Conicidad	0,029482	0,000046	1,1	-	0,01	0,032431
-	Cambio Herr.	0,037000	-	-	3	-	0,111000
Torno	Roscado	0,056158	0,000009	0,14	-	0,00	0,008023
-	Cambio Herr.	0,037000	-	-	3	-	0,111000
Torno	Conicidad	0,048918	0,000067	1,1	-	0,01	0,053810
-	Terminar	-	-	-	15	-	-
Total		0,735164	0,001721	18,830053	122	0,15	1,136005

Tiempos de mecanizado

Sierra de cinta		D (mm)	K (N/mm ²)	B (mm)	h (mm)	V (m/s)	t (seg)
Pieza	Material	Operación					
Capuchón	AlSi 304	Cortar	8	640	0,7	0,66666667	0,096
Taladro (Torno CNC ST-10)							
Pieza	Material	Operación	D (mm)	Fc (N/mm ²)	N (rpm)	Vc (m/min)	fn (Av./rev)
Capuchón	AlSi 304	Taladrado	4	2821,87451	1000	12,56	0,05
Capuchón	AlSi 304	Escariado	0,5	2821,87451	1000	14,13	0,05
Torno CNC ST-10							
Pieza	Material	Operación	D (mm)	p (mm/rev)	Vc (mm/min)	a _c ^z	Fc (N/mm ²)
Capuchón	AlSi 304	Conicidad	2	0,15	21195	1,14869835	1780,48245
Capuchón	AlSi 304	Refrentar	8	0,15	37680	1,37972966	2138,58098
Capuchón	AlSi 304	Moleteado	7	-	-	-	-
Capuchón	AlSi 304	Cilindrar	7	0,35	32970	1,31950791	2045,23726
Capuchón	AlSi 304	Conicidad	2,25	0,15	10597,5	1,14869835	1780,48245
Capuchón	AlSi 304	Roscado	4	0,35	18840	1,39542866	2162,91443
Capuchón	AlSi 304	Conicidad	6,5	0,15	30615	1,31950791	2045,23726
Torno CNC ST-10							
Pieza	Material	Operación	D (mm)	p (mm/rev)	Vc (mm/min)	a _c ^z	Fc (N/mm ²)
Capuchón	AlSi 304	Conicidad	2	0,15	21195	1,14869835	1780,48245
Capuchón	AlSi 304	Refrentar	8	0,15	37680	1,37972966	2138,58098
Capuchón	AlSi 304	Moleteado	7	-	-	-	-
Capuchón	AlSi 304	Cilindrar	7	0,35	32970	1,31950791	2045,23726
Capuchón	AlSi 304	Conicidad	2,25	0,15	10597,5	1,14869835	1780,48245
Capuchón	AlSi 304	Roscado	4	0,35	18840	1,39542866	2162,91443
Capuchón	AlSi 304	Conicidad	6,5	0,15	30615	1,31950791	2045,23726
Torno CNC ST-10							
Pieza	Material	Operación	D (mm)	p (mm/rev)	Vc (mm/min)	a _c ^z	Fc (N/mm ²)
Capuchón	AlSi 304	Conicidad	2	0,15	21195	1,14869835	1780,48245
Capuchón	AlSi 304	Refrentar	8	0,15	37680	1,37972966	2138,58098
Capuchón	AlSi 304	Moleteado	7	-	-	-	-
Capuchón	AlSi 304	Cilindrar	7	0,35	32970	1,31950791	2045,23726
Capuchón	AlSi 304	Conicidad	2,25	0,15	10597,5	1,14869835	1780,48245
Capuchón	AlSi 304	Roscado	4	0,35	18840	1,39542866	2162,91443
Capuchón	AlSi 304	Conicidad	6,5	0,15	30615	1,31950791	2045,23726

Tabla AC3.3

3. Boquilla



Consumos de energía

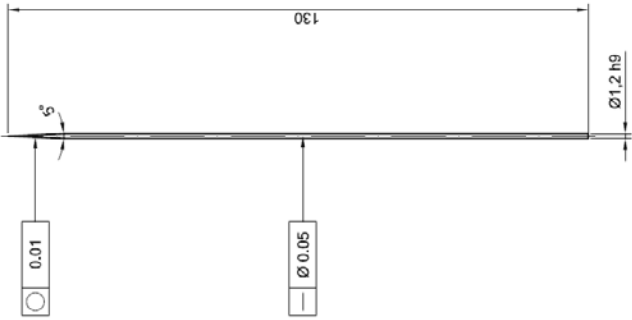
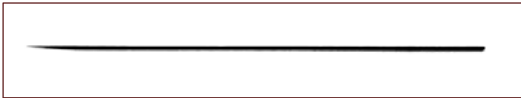
		Boquilla									
Máquina	Operación	Potencia (Kw)	Material (Kg)	T Prod (seg)	T Improd (s)	Desg. H. (gr)	Kw-seg				
-	Transporte	-	-	-	20	-	-				
Sierra	Cortar	0,186666667	0,00004	0,016875	-	0,00	0,003150				
-	Cambio maq.	-	-	-	15	-	-				
Taladro	Taladrado	0,001181	0,000016	6	-	0,005	0,007089				
-	Cambio Herr	-	-	-	10	-	-				
Taladro	Conicidad	0,000295	0,000002	3,75	-	0,003	0,001108				
-	Cambio Maq	-	-	-	15	-	-				
Torno	Cilindrado	0,020898	0,000072	1,33	-	0,011	0,027864				
-	Cambio Herr	0,037	-	-	2	-	0,074				
Torno	Ranurar	0,016933	0,000008	0,2	-	0,002	0,003367				
-	Cambio Herr	0,037	-	-	2	-	0,074				
Torno	Cilindrado	0,020696	0,000077	1,5	-	0,013	0,031044				
-	Cambio Herr	0,037	-	-	2	-	0,074				
Torno	Roscado	0,006922	0,000005	0,67	-	0,006	0,004614				
-	Cambio Herr	0,037	-	-	2	-	0,074				
Torno	Refrentar	0,011332	0,000001	0,17	-	0,001	0,001889				
-	Cambio Maq	-	-	-	15	-	-				
Fresadora	Ranurar	1,383601	0,000050	2,15	-	0,014	2,974742				
-	Cambio Maq	-	-	-	15	-	-				
Torno	Conicidad	0,012806	0,000032	0,93	-	0,008	0,011952				
-	Cambio Herr	0,037	-	-	2	-	0,074				
Torno	Refrentar	0,005225	0,000003	0,1	-	0,001	0,000522				
-	Terminar	-	-	-	15	-	-				
Total		1,851556	0,000306	16,816875	115	0,068	3,437361				

Tiempos de mecanizado

Sierra de cinta																
Pieza	Material	Operación	D (mm)	K (N/mm ²)	B (mm)	h (mm)	V (m/s)	t (seg)								
Boquilla	AlSi 304	Cortar	3	640	0.7	0.5	0.66666667	0.0135								
Taladro (Centro de mecanizado)																
Pieza	Material	Operación	D (mm)	Fc (N/mm ²)	N (rpm)	Vc (m/min)	f _n (Av./rev)	a _c -z	Long (mm)	t (seg)						
Boquilla	AlSi 304	Taladrado	0.8	2821.87451	1000	2.512	0.05	1.8205642	4	4.8						
Boquilla	AlSi 304	Conicidad	0.4	2821.87451	1000	1.256	0.05	1.8205642	2.5	3						
Torno (Centro de mecanizado)																
Pieza	Material	Operación	D (mm)	p (mm/rev)	Vc (mm/min)	a _c -z	Fc (N/mm ²)	Rend.	Prof. (mm)	Nº pasadas	Long. Pasada	Long. (mm)	t (seg)			
Boquilla	AlSi 304	Cilindrado	2.4	0.15	11304	1.27225964	1972.00244	0.8	0.3	2	2	4	1.0667			
Boquilla	AlSi 304	Cilindrado	2.25	0.15	10597.5	1.31950791	2045.23726	0.8	0.25	3	0.2	0.6	0.16			
Boquilla	AlSi 304	Cilindrado	2.75	0.15	12952.5	1.31950791	2045.23726	0.8	0.25	1	4.5	4.5	1.2			
Boquilla	AlSi 304	Roscado	1.8	0.15	8478	1.56068497	2419.06171	0.8	0.108	1	2	2	0.5333			
Boquilla	AlSi 304	Refrentar	1.8	0.15	8478	1.37972966	2136.58098	0.8	0.2	1	0.5	0.5	0.1333			
Boquilla	AlSi 304	Conicidad	1.3	0.15	6123	1.23363417	1912.13297	0.8	0.35	1	2.8	2.8	0.7467			
Boquilla	AlSi 304	Refrentar	0.6	0.15	2826	1.27225964	1972.00244	0.8	0.3	1	0.3	0.3	0.08			
Fresadora (Centro de mecanizado)																
Pieza	Material	Operación	D broca (mm)	f (mm/diente)	Z (Nº dte.)	N (rpm)	a _c -z	Vc (mm/min)	L (mm)	d (mm)	Fc (N/mm ²)	Nº pasadas	Long. Pasada	Long. (mm)	Vf (mm/min)	t (seg)
Boquilla	AlSi 304	Ranurar	9.7	0.05	3	2000	1.20112443	60916	1.83	0.4	1861.74287	2	4.3	8.6	300	1.72

Tabla AC3.4

5. Aguja



Consumos de energía

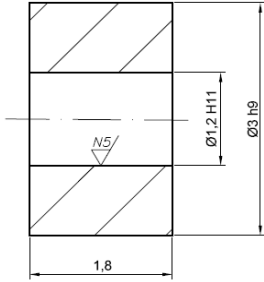
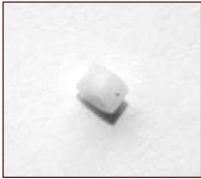
Máquina	Aguja						
	Operación	Potencia (Kw)	Material (Kg)	T Prod (seg)	T Improd (s)	Desg. H. (gr)	Kw-seg
-	Transporte	-	-	-	20	-	-
Sierra	Cortar	0,186667	0,00002	0,01	-	0,00	0,001400
-	Cambio maq.	-	-	-	15	-	-
Torno	Cilindrar	0,016442	0,001965	43,667	-	0,364	0,717946
Torno	Referentar	0,027377	0,000009	0,2	-	0,002	0,005475
Torno	Conicidad	0,013153	0,000041	4,58	-	0,038	0,060242
-	Terminar	-	-	-	15	-	-
Total		0,243638	0,002032	48,454167	50	0,406	0,785063

Tiempos de mecanizado

Sierra de cinta									
Pieza	Material	Operación	D (mm)	K (N/mm ²)	B (mm)	h (mm)	V (m/s)	t (seg)	
Aguja	AISI 304	Cortar	2	640	0,7	0,5	0,66666667	0,006	
Torno CNC ST-10									
Pieza	Material	Operación	φ (mm)	p (mm/rev)	Vc (mm/min)	a _c ^z	Fc (N/mm ²)	Rend.	Nº pasadas Long. Pasada Long. (mm) t (seg)
Aguja	AISI 304	Cilindrar	1,5	0,15	7065	1,20112443	1861,74287	0,8	1 131 34,933
Aguja	AISI 304	Referentar	1,2	0,15	5652	1	1550	0,8	1 0,6 0,16
Aguja	AISI 304	Conicidad	1,2	0,15	5652	1,20112443	1861,74287	0,8	1 13,74 3,664
Pulidora									
Pieza	Material	Operación	φ (mm)	p (mm/rev)	Vc (mm/min)	a _c ^z	Fc (N/mm ²)	Rend.	Nº pasadas Long. Pasada Long. (mm) t (seg)
Aguja	Al	Pulido	1	5	314000	4,5708819	1142,72047	0,8	2 1 131 0,015720

Tabla AC3.5

6. Arandela de empaque



Consumos de energía

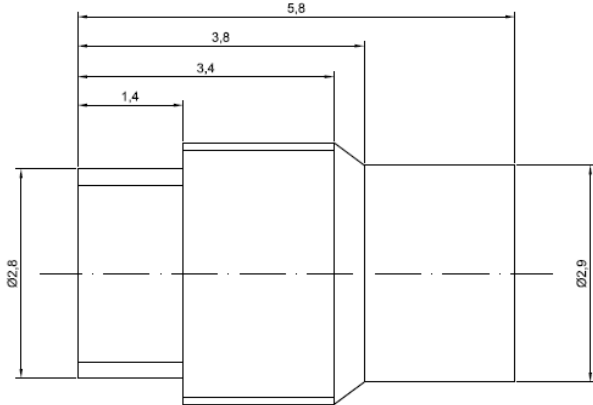
Arandela de empaque									
Máquina	Operación	Potencia (Kw)	Material (Kg)	T Prod (seg)	T Improd (s)	Desg. H. (gr)	Kw-seg		
-	Transporte	-	-	-	20	-	-		
Sierra	Cortar	0,009188	0,000019	0,03	-	0,01	0,000276		
-	Cambio maq.	-	-	-	15	-	-		
Taladro	Taladrado	0,002590	0,000004	1,6875	-	0,003	0,004370		
-	Cambio Maq	-	-	-	15	-	-		
Torno	Cilindrar	0,001938	0,0000007	0,6	-	0,005	0,001163		
-	Cambio Herr	0,037	-	-	2	-	0,074		
Torno	Cilindrar	0,040012	0,000022	0,6	-	0,005	0,024007		
-	Terminar	-	-	-	15	-	-		
Total		0,090727	0,000046	2,9175	67	0,0203125	0,103816		

Tiempos de mecanizado

Sierra de cinta									
Pieza	Material	Operación	D (mm)	K (N/mm ²)	B (mm)	h (mm)	V (m/s)	t (seg)	
A. empaque	PTFE	Cortar	4	31,5	0,7	0,5	0,66666667	0,024	
Taladro (Torno CNC ST-10)									
Pieza	Material	Operación	D (mm)	Fc (N/mm ²)	N (rpm)	Vc (m/min)	f _n (Av/rev)	a _c z	t (seg)
A. empaque	PTFE	Taladrado	1,1	2044,86451	1000	3,454	0,08	1,46061751	1,35
Torno CNC ST-10									
Pieza	Material	Operación	φ (mm)	p (mm/rev)	Vc (mm/min)	a _c z	Fc (N/mm ²)	Rend.	Nº pasadas
A. empaque	PTFE	Cilindrar	1,2	0,15	5652	1,56730854	2194,23195	0,8	1
A. empaque	PTFE	Cilindrar	3,5	0,15	16485	1,10956947	1553,39726	0,8	1
									Long. (mm)
									1,8
									1,8
									0,48
									0,48

Tabla AC3.6

7. Tuerca de empaque



Consumos de energía

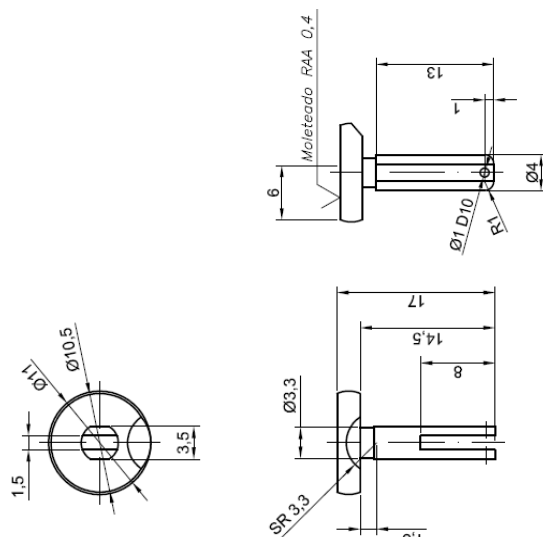
Tuerca de empaque									
Máquina	Operación	Potencia (Kw)	Material (Kg)	T Prod (seg)	T Improd (s)	Desg. H. (gr)	Kw-seg		
-	Transportar	-	-	-	20	-	-		
Sierra	Cortar	0,102063	0,000075	0,03	-	0,01	0,003063		
-	Cambio maq.	-	-	-	15	-	-		
Taladro	Taladrado	0,001808	0,000090	9	-	0,015	0,016270		
-	Cambio Maq	-	-	-	15	-	-		
Torno	Cilindrar	0,009760	0,000056	0,8	-	0,007	0,007808		
Torno	Cilindrar	0,008645	0,000094	1,4667	-	0,012	0,012680		
Torno	Conicidad	0,011089	0,000005	0,1333	-	0,001	0,001479		
-	Cambio Herr	0,037	-	-	2	-	0,074		
Torno	Refrentar	0,006918	0,000011	0,4833	-	0,004	0,003344		
-	Cambio Herr	0,037	-	-	2	-	0,074		
Torno	Cilindrar	0,008871	0,000063	0,9333	-	0,008	0,008280		
-	Cambio Maq	-	-	-	15	-	-		
Fresadora	Ranurado	0,002892	0,000000	0,35	-	0,001	0,001012		
-	Cambio Maq	-	-	-	15	-	-		
Torno	Roscado	0,018724	0,000018	0,2857	-	0,002	0,005350		
-	Terminar	-	-	-	15	-	-		
Total		0,244792	0,000411	13,4824	99	0,06	0,207285		

Tiempos de mecanizado

Sierra de cinta									
Pieza	Material	Operación	D (mm)	K (N/mm ²)	B (mm)	h (mm)	V (m/s)	t (seg)	
T. empaque	CW614N	Cortar	4	350	0,7	0,5	0,66666667	0,024	
Taladro (Centro de mecanizado)									
Pieza	Material	Operación	D (mm)	Fc (N/mm ²)	N (rpm)	Vc (m/min)	f _n (Av/rev)	a _c -z	t (seg)
T. empaque	CW614N	Taladrado	1,5	1228,22803	1000	4,71	0,05	2,45645605	6
Torno (Centro de mecanizado)									
Pieza	Material	Operación	φ (mm)	p (mm/rev)	Vc (mm/min)	a _c -z	Fc (N/mm ²)	Rend.	
T. empaque	CW614N	Cilindrar	3,5	0,15	16485	1,51571657	757,858283	0,8	
T. empaque	CW614N	Cilindrar	2,9	0,15	13659	1,47299133	736,495667	0,8	
T. empaque	CW614N	Conicidad	3,5	0,15	16485	1,43503873	717,519367	0,8	
T. empaque	CW614N	Refrentar	2,9	0,15	13659	1,6206566	810,328298	0,8	
T. empaque	CW614N	Cilindrar	2,8	0,15	13188	1,43503873	717,519367	0,8	
T. empaque	CW614N	Roscado	3,5	0,35	16485	1,64839565	824,197823	0,8	
Fresadora (Centro de mecanizado)									
Pieza	Material	Operación	φ Broca (mm)	f (mm/diente)	Z (N° dle.)	N (rpm)	a _c -z	Vc (mm/min)	
T. empaque	CW614N	Ranurado	0,75	0,05	3	2000	2,45645605	4710	
Nº pasadas Long. Pasada Long. (mm) Vf (mm/min) t (seg)									
			d (mm)						
			0,05	0,75	1,4	1,4	1	982,582421	300
			0,05	0,75	1,4	1,4	1	982,582421	300

Tabla AC3.8

9 Palanca



Consumos de energía

Máquina	Operación	Palanca de acción					Kw-seg
		Potencia (Kw)	Material (Kg)	T Prod (seg)	T Improd (s)	Desg. H. (gr)	
-	Transporte	-	-	-	20	-	-
Sierra	Cortar	0,186667	0,000630	0,27	-	0,07	0,050400
-	Cambio maq.	-	-	-	15	-	-
Tono	Cilindrar (DS-30Y)	0,086547	0,000359	1,67	-	0,014	0,144245
Tono	Cilindrar (DS-30Y)	0,060207	0,011597	77,33	-	0,644	4,655983
-	Cambio Herr	0,037	-	-	2	-	0,074
Tono	Ranurar (DS-30Y)	0,032507	0,000052	0,60	-	0,005	0,019504
-	Cambio Herr	0,037	-	-	2	-	0,074
Tono	Avellanada (DS-30Y)	0,082784	0,000052	0,83	-	0,007	0,068987
-	Cambio Maq	-	-	-	15	-	-
Fresadora	Planear (DS-30Y)	1,634147	0,000074	8,06	-	0,054	13,163966
-	Cambio Maq	-	-	-	15	-	-
Taladro	Taladrado	0,001846	0,000025	6	-	0,005	0,011076
-	Cambio Maq	-	-	-	15	-	-
Fresadora	Ranurado (DS-30Y)	0,002865	0,003057	102,86	-	0,086	0,294684
-	Cambio Herr	0,037	-	-	2	-	0,074
Fresadora	Muesca (DS-30Y)	1,411566	0	0,31	-	0,001	0,441114
-	Cambio Maq	-	-	-	15	-	-
Tono	Moleteado (DS-30Y)	-	-	-	-	-	-
-	Terminar	-	-	-	15	-	-
Total		3,6101	0,0158	197,93	116	0,883	19,072

Tiempos de mecanizado

Pieza	Material	Operación	Sierra de cinta					t (seg)
			D (mm)	K (N/mm ²)	B (mm)	h (mm)	V (m/s)	
P.A./Palanca	AlSi 304	Cortar	12	640	0,7	0,5	0,66666667	0,216
P.A./Presio.	CW614N	Cortar	4	350	0,7	0,5	0,66666667	0,024
P.A./Pasador	CW614N	Cortar	2	350	0,7	0,5	0,66666667	0,006

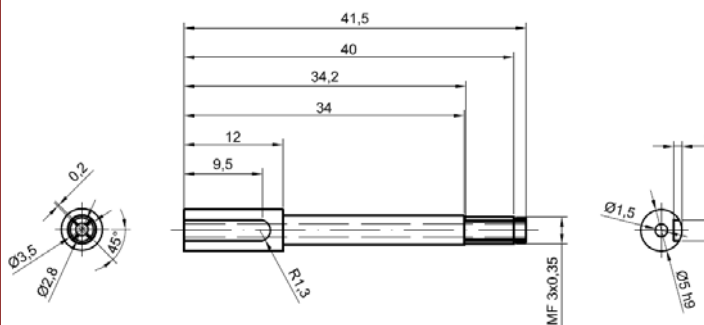
Taladro (Torno CNC DS-30Y)									
Pieza	Material	Operación	D (mm)	Fc (N/mm ²)	N (rpm)	Vc (mm/min)	fn (Av./rev)	a _c z	t (seg)
P.A./Palanca	AlSi 304	Taladrado	1	2821,87451	1000	3,14	0,05	1,8205642	4

Torno CNC DS-30Y; Centro de mecanizado; Torno CNC ST-10									
Pieza	Material	Operación	φ (mm)	p (mm/rev)	N (rpm)	Vc (mm/min)	a _c z	Fc (N/mm ²)	t (seg)
P.A./Palanca	AlSi 304	lindrar (DS-30)	11,5	0,15	54165	1,31950791	2045,23726	0,8	1,33
P.A./Palanca	AlSi 304	lindrar (DS-30)	8	0,15	37680	1,31950791	2045,23726	0,8	61,87
P.A./Palanca	AlSi 304		3,3	0,15	15543	1,23363417	1912,13297	0,8	0,48
P.A./Palanca	AlSi 304	llanada (DS-3)	11	0,15	51810	1,31950791	2045,23726	0,8	0,67
P.A./Palanca	AlSi 304	leteado (DS-3)	-	-	-	-	-	-	-

Torno CNC DS-30Y; Centro de mecanizado									
Pieza	Material	Operación	φ Broca (mm)	f (mm/diente)	Z (N° die.)	N (rpm)	a _c z	Vc (mm/min)	t (seg)
P.A./Palanca	AlSi 304	aneado (DS-30)	10	0,045	3	2000	1,23363417	62800	2,26
P.A./Palanca	AlSi 304	nurado (DS-30)	0,5	0,035	2	2000	1,9551784	3140	0,5
P.A./Palanca	AlSi 304	uesca (DS-30)	6,6	0,05	3	2000	1,330325	41448	4

Tabla AC3.11

12. Eje-muelle



Consumos de energía

		Eje del muelle						
Máquina	Operación	Potencia (Kw)	Material (Kg)	T Prod (seg)	T Improd (s)	Desg. H. (gr)	Kw-seg	
-	Transportar	-	-	-	20	-	-	
Sierra	Cortar	0,186667	0,000132	0,06	-	0,01	0,010588	
-	Cambio maq.	-	-	-	15	-	-	
Taladro	Taladrado	0,004153	0,000590	63	-	0,053	0,2617	
-	Cambio Maq	-	-	-	15	-	-	
Tomo	Cilindrar	0,037629	0,000375	4	-	0,033	0,1505	
-	Cambio Herr	0,037	-	-	2	-	0,074	
Tomo	Referentar	0,037629	0,000073	1,25	-	0,010	0,0470	
-	Cambio Maq	-	-	-	15	-	-	
Fresadora	Ranurado	0,055506	0,000015	5,57	-	0,005	0,3090	
-	Cambio Maq	-	-	-	15	-	-	
Tomo	Cilindrar	0,033866	0,002474	29,33	-	0,244	0,9934	
Tomo	Cilindrar	0,031985	0,000797	10	-	0,083	0,3198	
Tomo	Cilindrar	0,022411	0,000142	2,5	-	0,021	0,0560	
-	Cambio Herr	0,037	-	-	2	-	0,074	
Tomo	Roscado	0,042118	0,000043	0,86	-	0,007	0,0361	
-	-	-	-	-	-	-	-	
-	Cambio Maq	-	-	-	15	-	-	
Fresadora	Ranurado	0,036586	0,0000002	0,65	-	0,009	0,02378	
-	Terminar	-	-	-	15	-	-	
Total		0,562550	0,004642	117,21	114	0,48	2,3559	

Tiempos de mecanizado

Sierra de cinta															
Pieza	Material	Operación	D (mm)	K (N/mm ²)	B (mm)	h (mm)	V (m/s)	t (seg)							
Eje muelle	AISI 304	Cortar	5,5	640	0,7	0,5	0,66666667	0,045375							
Taladro (Centro de mecanizado)															
Pieza	Material	Operación	D (mm)	Fc (N/mm ²)	N (rpm)	Vc (m/min)	fn (Av/rev)	a _c -z	Long (mm)	t (seg)					
Eje muelle	AISI 304	Taladrado	1,5	2821,87451	1000	4,71	0,05	1,8205642	42	50,4					
Torno (Centro de mecanizado)															
Pieza	Material	Operación	φ (mm)	p (mm/rev)	Vc (mm/min)	a _c -z	Fc (N/mm ²)	Rend.	Prof. (mm)	Nº pasadas	Long. Pasada Long. (mm)	t (seg)			
Eje muelle	AISI 304	Cilindrar	5	0,15	23550	1,31950791	2045,23726	0,8	0,25	1	12	3,2			
Eje muelle	AISI 304	Refrentar	5	0,15	23550	1,31950791	2045,23726	0,8	0,25	1	3,75	1			
Eje muelle	AISI 304	Cilindrar	4,5	0,15	21195	1,31950791	2045,23726	0,8	0,25	4	22	88			
Eje muelle	AISI 304	Cilindrar	4,25	0,15	20017,5	1,31950791	2045,23726	0,8	0,25	5	6	30			
Eje muelle	AISI 304	Cilindrar	2,8	0,15	13188	1,29935328	2013,99758	0,8	0,27	5	1,5	7,5			
Eje muelle	AISI 304	Roscado	3	0,35	14130	1,39542866	2162,91443	0,8	0,189	1	6	0,69			
Fresadora (Centro de mecanizado)															
Pieza	Material	Operación	φ Broca (mm)	f (mm/diente)	Z (Nº die.)	N (rpm)	a _c -z	Vc (mm/min)	L (mm)	d (mm)	Fc (N/mm ²)	Nº pasadas	Long. Pasada Long. (mm)	Vf (mm/min)	t (seg)
Eje muelle	AISI 304	Ranurado	2,5	0,08	2	2000	1,65722701	15700	1	0,08	2651,56321	2,5	9,5	320	4,453125
Eje muelle	AISI 304	Ranurado	12	0,05	3	2000	1,8205642	75360	0,2	0,05	2912,90272	4	0,65	300	0,52

Tabla AC3.13

15. Contratuera



Consumos de energía

Ajustador de la aguja									
Máquina	Operación	Potencia (Kw)	Material (Kg)	T Prod (seg)	T Improd (s)	Desg. H. (gr)	Kw-seg		
-	Transportar	-	-	-	20	-	-		
Sierra	Cortar	0,186667	0,000214	0,09	-	0,02	0,017150		
-	Cambio maq.	-	-	-	15	-	-		
Taladro	Taladrado	0,004153	0,000148	15,75	-	0,013	0,0654		
-	Cambio Maq	-	-	-	15	-	-		
Tono	Conicidad	0,015614	0,000055	2,6	-	0,022	0,0406		
-	Cambio Herr	0,037	-	-	2	-	0,074		
Tono	Roscado	0,042118	0,000037	0,74	-	0,006	0,0313		
-	Cambio Herr	0,037	-	-	2	-	0,074		
Tono	Cilindrar	0,048918	0,000171	1,4	-	0,012	0,0685		
Tono	Cilindrar	0,045155	0,000334	2,97	-	0,025	0,1340		
Tono	Conicidad	0,036918	0,000430	5,19	-	0,043	0,1917		
-	Cambio Herr	0,037	-	-	2	-	0,074		
Tono	Refrentar	0,017008	0,000004	0,38	-	0,003	0,0064		
Tono	Refrentar	0,048918	0,000062	1,08	-	0,009	0,0530		
-	Cambio Herr	0,037	-	-	2	-	0,074		
Tono	Cilindrar	0,041392	0,000165	1,6	-	0,013	0,0662		
Tono	Conicidad	0,027507	0,000010	0,53	-	0,004	0,0147		
-	Cambio Herr	0,037	-	-	2	-	0,074		
Tono	Moletado	-	-	-	-	-	-		
-	Cambio Herr	0,037	-	-	2	-	0,074		
Tono	Avellando	0,039134	0,000015	0,30	-	0,003	0,0117		
-	Terminar	-	-	-	15	-	-		
Total		0,775503	0,001644	32,64	77	0,18	1,1446		

Consumos de energía

Ajustador de la aguja									
Máquina	Operación	Potencia (Kw)	Material (Kg)	T Prod (seg)	T Improd (s)	Desg. H. (gr)	Kw-seg		
-	Transportar	-	-	-	20	-	-		
Sierra	Cortar	0,186667	0,000214	0,09	-	0,02	0,017150		
-	Cambio maq.	-	-	-	15	-	-		
Taladro	Taladrado	0,004153	0,000148	15,75	-	0,013	0,0654		
-	Cambio Maq	-	-	-	15	-	-		
Tono	Conicidad	0,015614	0,000055	2,6	-	0,022	0,0406		
-	Cambio Herr	0,037	-	-	2	-	0,074		
Tono	Roscado	0,042118	0,000037	0,74	-	0,006	0,0313		
-	Cambio Herr	0,037	-	-	2	-	0,074		
Tono	Cilindrar	0,048918	0,000171	1,4	-	0,012	0,0685		
Tono	Cilindrar	0,045155	0,000334	2,97	-	0,025	0,1340		
Tono	Conicidad	0,036918	0,000430	5,19	-	0,043	0,1917		
-	Cambio Herr	0,037	-	-	2	-	0,074		
Tono	Refrentar	0,017008	0,000004	0,38	-	0,003	0,0064		
Tono	Refrentar	0,048918	0,000062	1,08	-	0,009	0,0530		
-	Cambio Herr	0,037	-	-	2	-	0,074		
Tono	Cilindrar	0,041392	0,000165	1,6	-	0,013	0,0662		
Tono	Conicidad	0,027507	0,000010	0,53	-	0,004	0,0147		
-	Cambio Herr	0,037	-	-	2	-	0,074		
Tono	Moletado	-	-	-	-	-	-		
-	Cambio Herr	0,037	-	-	2	-	0,074		
Tono	Avellando	0,039134	0,000015	0,30	-	0,003	0,0117		
-	Terminar	-	-	-	15	-	-		
Total		0,775503	0,001644	32,64	77	0,18	1,1446		

Ajustador de la aguja									
Máquina	Operación	Potencia (Kw)	Material (Kg)	T Prod (seg)	T Improd (s)	Desg. H. (gr)	Kw-seg		
-	Transportar	-	-	-	20	-	-		
Sierra	Cortar	0,186667	0,000214	0,09	-	0,02	0,017150		
-	Cambio maq.	-	-	-	15	-	-		
Taladro	Taladrado	0,004153	0,000148	15,75	-	0,013	0,0654		
-	Cambio Maq	-	-	-	15	-	-		
Tono	Conicidad	0,015614	0,000055	2,6	-	0,022	0,0406		
-	Cambio Herr	0,037	-	-	2	-	0,074		
Tono	Roscado	0,042118	0,000037	0,74	-	0,006	0,0313		
-	Cambio Herr	0,037	-	-	2	-	0,074		
Tono	Cilindrar	0,048918	0,000171	1,4	-	0,012	0,0685		
Tono	Cilindrar	0,045155	0,000334	2,97	-	0,025	0,1340		
Tono	Conicidad	0,036918	0,000430	5,19	-	0,043	0,1917		
-	Cambio Herr	0,037	-	-	2	-	0,074		
Tono	Refrentar	0,017008	0,000004	0,38	-	0,003	0,0064		
Tono	Refrentar	0,048918	0,000062	1,08	-	0,009	0,0530		
-	Cambio Herr	0,037	-	-	2	-	0,074		
Tono	Cilindrar	0,041392	0,000165	1,6	-	0,013	0,0662		
Tono	Conicidad	0,027507	0,000010	0,53	-	0,004	0,0147		
-	Cambio Herr	0,037	-	-	2	-	0,074		
Tono	Moletado	-	-	-	-	-	-		
-	Cambio Herr	0,037	-	-	2	-	0,074		
Tono	Avellando	0,039134	0,000015	0,30	-	0,003	0,0117		
-	Terminar	-	-	-	15	-	-		
Total		0,775503	0,001644	32,64	77	0,18	1,1446		

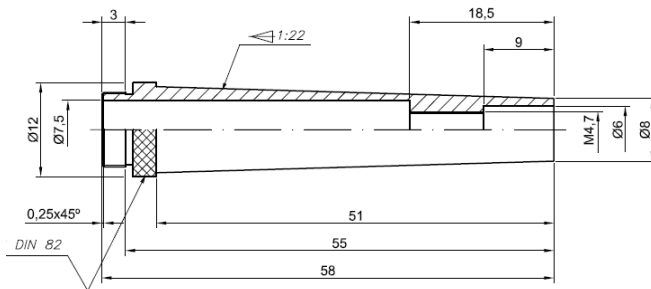
Ajustador de la aguja									
Máquina	Operación	Potencia (Kw)	Material (Kg)	T Prod (seg)	T Improd (s)	Desg. H. (gr)	Kw-seg		
-	Transportar	-	-	-	20	-	-		
Sierra	Cortar	0,186667	0,000214	0,09	-	0,02	0,017150		
-	Cambio maq.	-	-	-	15	-	-		
Taladro	Taladrado	0,004153	0,000148	15,75	-	0,013	0,0654		
-	Cambio Maq	-	-	-	15	-	-		
Tono	Conicidad	0,015614	0,000055	2,6	-	0,022	0,0406		
-	Cambio Herr	0,037	-	-	2	-	0,074		
Tono	Roscado	0,042118	0,000037	0,74	-	0,006	0,0313		
-	Cambio Herr	0,037	-	-	2	-	0,074		
Tono	Cilindrar	0,048918	0,000171	1,4	-	0,012	0,0685		
Tono	Cilindrar	0,045155	0,000334	2,97	-	0,025	0,1340		
Tono	Conicidad	0,036918	0,000430	5,19	-	0,043	0,1917		
-	Cambio Herr	0,037	-	-	2	-	0,074		
Tono	Refrentar	0,017008	0,000004	0,38	-	0,003	0,0064		
Tono	Refrentar	0,048918	0,000062	1,08	-	0,009	0,0530		
-	Cambio Herr	0,037	-	-	2	-	0,074		
Tono	Cilindrar	0,041392	0,000165	1,6	-	0,013	0,0662		
Tono	Conicidad	0,027507	0,000010	0,53	-	0,004	0,0147		
-	Cambio Herr	0,037	-	-	2	-	0,074		
Tono	Moletado	-	-	-	-	-	-		
-	Cambio Herr	0,037	-	-	2	-	0,074		
Tono	Avellando	0,039134	0,000015	0,30	-	0,003	0,0117		
-	Terminar	-	-	-	15	-	-		
Total		0,775503	0,001644	32,64	77	0,18	1,1446		

Ajustador de la aguja									
Máquina	Operación	Potencia (Kw)	Material (Kg)	T Prod (seg)	T Improd (s)	Desg. H. (gr)	Kw-seg		
-	Transportar	-	-	-	20	-	-		
Sierra	Cortar	0,186667	0,000214	0,09	-	0,02	0,017150		
-	Cambio maq.	-	-	-	15	-	-		
Taladro	Taladrado	0,004153	0,000148	15,75	-	0,013	0,0654		
-	Cambio Maq	-	-	-	15	-	-		
Tono	Conicidad	0,015614	0,000055	2,6	-	0,022	0,0406		
-	Cambio Herr	0,037	-	-	2	-	0,074		
Tono	Roscado	0,042118	0,000037	0,74	-	0,006	0,0313		
-	Cambio Herr	0,037	-	-	2	-	0,074		
Tono	Cilindrar	0,048918	0,000171	1,4	-	0,012	0,0685		
Tono	Cilindrar	0,045155	0,000334	2,97	-	0,025	0,1340		
Tono	Conicidad	0,036918	0,000430	5,19	-	0,043	0,1917		
-	Cambio Herr	0,037	-	-	2	-	0,074		
Tono	Refrentar	0,017008	0,000004	0,38	-	0,003	0,0064		
Tono	Refrentar	0,048918	0,000062	1,08	-	0,009	0,0530		
-	Cambio Herr	0,037	-	-	2	-	0,074		
Tono	Cilindrar	0,041392	0,000165	1,6	-	0,013	0,0662		
Tono	Conicidad	0,027507	0,000010	0,53	-	0,004	0,0147		
-	Cambio Herr	0,037	-	-	2	-	0,074		
Tono	Moletado	-	-	-	-	-	-		
-	Cambio Herr	0,037	-	-	2	-	0,074		
Tono	Avellando	0,039134	0,000015	0,30	-	0,003	0,0117		
-	Terminar	-	-	-	15	-	-		
Total		0,775503	0,001644	32,64	77	0,18	1,1446		

Ajustador de la aguja							
Máquina	Operación	Potencia (Kw)	Material (Kg)	T Prod (seg)	T Improd (s)	Desg. H. (gr)	Kw-seg
-	Transportar	-	-	-	20	-	-
Sierra	Cortar	0,186667	0,000214	0,09	-	0,02	0,017150
-	Cambio maq.	-	-	-	15	-	-
Taladro	Taladrado	0,004153	0,000148	15,75	-	0,013	0,0654
-	Cambio Maq	-	-	-	15	-	-
Tono	Conicidad	0,015614	0,000055	2,6	-	0,022	0,0406
-	Cambio Herr	0,037	-	-	2	-	0,074
Tono	Roscado	0,042118	0,000037	0,74	-	0,006	0,0313
-	Cambio Herr	0,037	-	-	2	-	0,074
Tono	Cilindrar	0,048918	0,000171	1,4	-	0,012	0,0685
Tono	Cilindrar	0,045155	0,000334	2,97	-	0,025	0,1340
Tono	Conicidad	0,036918	0,000430	5,19	-	0,043	0,1917
-	Cambio Herr	0,037	-	-	2	-	0,074
Tono	Refrentar	0,017008	0,000004	0,38	-	0,003	0,0064
Tono	Refrentar	0,048918	0,000062	1,08	-	0,009	0,0530
-	Cambio Herr	0,037	-	-	2	-	0,074
Tono	Cilindrar	0,041392	0,000165	1,6	-	0,013	0,0662
Tono	Conicidad	0,027507	0,000010	0,53	-	0,004	0,0147
-	Cambio Herr	0,037	-	-	2	-	0,074
Tono	Moleteado	-	-	-	-	-	-
-	Cambio Herr	0,037	-	-	2	-	0,074
Tono	Avellando	0,039134	0,000015	0,30	-	0,003	0,0117
-	Terminar	-	-	-	15	-	-
Total		0,775503	0,001644	32,64	77	0,18	1,1446

Tabla AC3.14

16. Mango



Consumos de energía

Máquina	Operación	Potencia (Kw)	Mango				T Prod (seg)	T Improd (s)	Desg. H. (gr)	Kw-seg
			Material (Kg)	-	-	-				
-	Transporte	-	-	-	-	20	-	-	-	-
-	Sierra	0,186667	0,000739	0,32	-	-	-	0,08	-	0,059150
-	Cambio maq.	-	-	-	-	15	-	-	-	-
-	Taladro	0,040778	0,008144	88,5	-	-	-	0,738	-	3,6088
-	Cambio Maq	-	-	-	-	15	-	-	-	-
-	Escariado	0,073879	0,008538	53,333	-	-	-	0,444	-	3,9402
-	Tomo	0,055701	0,011651	12,667	-	-	-	0,106	-	0,7055
-	Cambio Herr	0,037	-	-	-	2	-	-	-	0,074
-	Roscado	0,288574	0,000240	0,599	-	-	-	0,005	-	0,11729
-	Cambio Herr	0,037	-	-	-	2	-	-	-	0,074
-	Cilindrar	0,094073	0,011172	5,000	-	-	-	0,042	-	0,4704
-	Tomo	0,090310	0,015447	68,667	-	-	-	0,572	-	6,2013
-	Cilindrar	0,094042	0,01296	5,333	-	-	-	0,044	-	0,5016
-	Tomo	0,114504	0,006637	42,917	-	-	-	0,358	-	4,9141
-	Cambio Herr	0,037	-	-	-	2	-	-	-	0,074
-	Refrentar	0,090310	0,000612	2,167	-	-	-	0,018	-	0,1957
-	Cambio Herr	0,037	-	-	-	2	-	-	-	0,074
-	Cilindrar	0,094042	0,01296	5,333	-	-	-	0,044	-	0,5016
-	Tomo	0,037	-	-	-	2	-	-	-	0,074
-	Cambio Herr	0,064991	0,000108	0,667	-	-	-	0,006	-	0,0433
-	Ranurar	0,037	-	-	-	2	-	-	-	0,074
-	Cambio Herr	0,037	-	-	-	2	-	-	-	0,0433
-	Roscado	0,785300	0,000246	0,236	-	-	-	0,002	-	0,1855
-	Cambio Herr	0,037	-	-	-	2	-	-	-	0,074
-	Tomo	-	-	-	-	2	-	-	-	-
-	Moleteado	-	-	-	-	2	-	-	-	-
-	Cambio Herr	0,037	-	-	-	2	-	-	-	0,074
-	Avellando	0,071684	0,000007	0,083	-	-	-	0,001	-	0,0060
-	Terminar	-	-	-	-	15	-	-	-	-
-	Total	2,346811	0,044837	280,485	-	81	-	2,41	-	21,5964

Tiempos de mecanizado

Sierra de cinta													
Pieza	Material	Operación	D (mm)	K (N/mm ²)	B (mm)	h (mm)	V (m/s)	t (seg)					
Mango	AlSi 304	Cortar	13	640	0,7	0,5	0,66666667	0,2535					
Taladro (Torno CNC DS-30)													
Pieza	Material	Operación	D (mm)	Fc (N/mm ²)	N (rpm)	Vc (m/min)	f _n (Δv/rev)	a _c ^z	Long (mm)	t (seg)			
Mango	AlSi 304	Escariado	4,7	2821,87451	1000	14,758	0,05	1,8205642	59	70,8			
Torno CNC DS-30													
Pieza	Material	Operación	φ (mm)	p (mm/rev)	Vc (mm/min)	a _c ^z	Fc (N/mm ²)	Rend.	Prof. (mm)	Nº pasadas	Long. Pasada	Long. (mm)	t (seg)
Mango	AlSi 304	Escariado	7,5	0,15	35325	1,23363417	1912,13297	0,8	0,35	4	40	160	42,667
Mango	AlSi 304	Escariado	6	0,15	28260	1,25205477	1940,6849	0,8	0,325	2	19	38	10,133
Mango	AlSi 304	Roscado	4,7	0,793	22137	1,18387625	1835,00819	0,8	0,43	1	9,5	9,5	0,479
Mango	AlSi 304	Cilindrar	12,5	0,15	58875	1,31950791	2045,23726	0,8	0,25	2	7,5	15	4,000
Mango	AlSi 304	Cilindrar	12	0,15	56520	1,31950791	2045,23726	0,8	0,25	4	51,5	206	54,933
Mango	AlSi 304	Conicidad	11	0,15	51810	1,21672888	1885,92946	0,8	0,375	2,5	51,5	128,75	34,333
Mango	AlSi 304	Refrentar	12	0,15	56520	1,31950791	2045,23726	0,8	0,25	2	3,25	6,5	1,733
Mango	AlSi 304	Cilindrar	10,8	0,15	50868	1,27225964	1972,00244	0,8	0,3	4	4	16	4,267
Mango	AlSi 304		8,5	0,15	40035	1,3142923	2037,15307	0,8	0,255	2	1	2	0,533
Mango	AlSi 304	Roscado	9,525	1,27	44862,75	1,23718937	1917,64353	0,8	0,345	2	3	6	0,189
Mango	AlSi 304	Moleteado	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Mango	AlSi 304	Avellando	9,525	0,15	44862,75	1,31950791	2045,23726	0,8	0,25	1	0,25	0,25	0,067

Tabla AC3.15

17. Tornillo-ajuste



Consumos de energía

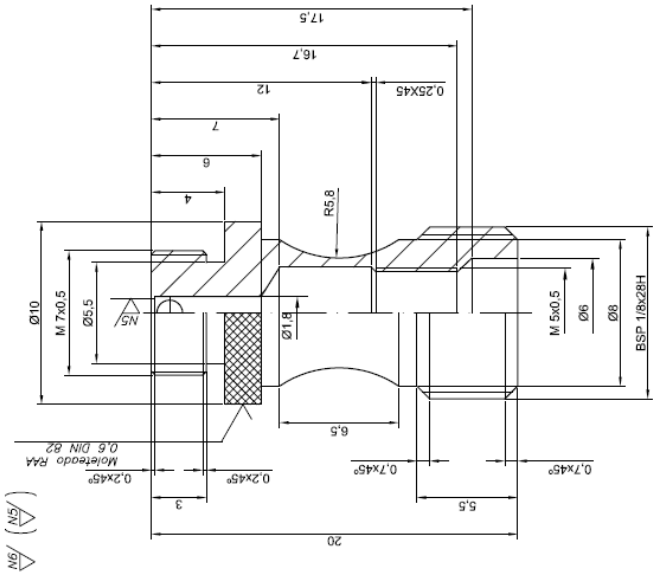
Tornillo de ajuste de la aguja									
Máquina	Operación	Potencia (Kw)	Material (Kg)	T Prod (seg)	T Improd (s)	Desg. H. (gr)	Kw-seg		
-	Transporte	-	-	-	20	-	-	-	-
Sierra	Cortar	0,186667	0,000354	0,15	-	0,04	0,028350	-	-
-	Cambio maq.	-	-	-	15	-	-	-	-
Taladro	Taladrado	0,005981	0,000729	54	-	0,045	0,3230	-	-
-	Cambio Maq	-	-	-	15	-	-	-	-
Tono	Avellando	0,013547	0,000004	0,25	-	0,002	0,0034	-	-
Tono	Cilindrar	0,063970	0,000659	4,13	-	0,034	0,2644	-	-
Tono	Cilindrar	0,067851	0,002456	13,83	-	0,115	0,9386	-	-
Tono	Cilindrar	0,069326	0,004458	24	-	0,200	1,6638	-	-
Tono	Cilindrar	0,058478	0,003859	25,33	-	0,211	1,4815	-	-
-	Cambio Herr	0,037	-	-	2	-	0,074	-	-
Tono	Refrentar	0,030103	0,000040	0,73	-	0,006	0,0221	-	-
Tono	Refrentar	0,060207	0,000190	2,07	-	0,017	0,1244	-	-
-	Cambio Herr	0,037	-	-	2	-	0,074	-	-
Tono	Avellando	0,030103	0,000009	0,25	-	0,002	0,0075	-	-
-	Cambio Herr	0,037	-	-	2	-	0,074	-	-
Tono	Ranurar	0,059016	0,000055	0,33	-	0,003	0,0197	-	-
Tono	Ranurar	0,048176	0,000090	0,67	-	0,006	0,0321	-	-
Tono	Ranurar	0,028203	0,000006	0,1	-	0,001	0,0028	-	-
-	Cambio Herr	0,037	-	-	2	-	0,074	-	-
Tono	Roscado	0,292381	0,000307	0,76	-	0,006	0,2212	-	-
-	Cambio Herr	0,037	-	-	2	-	0,074	-	-
Tono	Esféricado	0,037134	0,000260	5,33	-	0,044	0,1980	-	-
Tono	Esféricado	0,069661	0,000120	1,33	-	0,011	0,0929	-	-
-	Cambio Herr	0,037	-	-	2	-	0,074	-	-
Tono	Moleteado	-	-	-	-	-	-	-	-
-	Terminar	-	-	-	15	-	-	-	-
Total			1,342803	0,013596	133,28	0,74	5,8678		

Tiempos de mecanizado

Pieza	Material	Operación	Sierra de cinta					Taladro (Torno CNC DS-30)					Torno CNC DS-30				
			D (mm)	K (N/mm ²)	B (mm)	h (mm)	V (m/s)	t (seg)	D (mm)	Fc (N/mm ²)	N (rpm)	Vc (m/min)	fn (Av/rev)	a _z	Fc (N/mm ²)	Rend.	t (seg)
Tor. Ajuste	AlSi 304	Cortar	9	640	0,7	0,5	0,66666667	0,1215									
Pieza	Material	Operación	D (mm)	Fc (N/mm ²)	N (rpm)	Vc (m/min)	fn (Av/rev)	a _z									
Tor. Ajuste	AlSi 304	Taladrado	1,8	2821,87451	1000	5,652	0,05	1,8205642	36								
Pieza	Material	Operación	φ (mm)	p (mm/rev)	Vc (mm/min)	a _z	Fc (N/mm ²)	Rend.	Prof. (mm)	Nº pasadas	Long. Pasada (mm)	Long. (mm)	t (seg)				
Tor. Ajuste	AlSi 304	Avellando	1,8	0,15	8478	1,31950791	2045,23726	0,8	0,25	1,5	0,5	0,75	0,2				
Tor. Ajuste	AlSi 304	Cilindrar	8,5	0,15	40035	1,31950791	2045,23726	0,8	0,25	2	6,2	12,4	3,31				
Tor. Ajuste	AlSi 304	Cilindrar	7,4	0,15	34854	1,25594322	1946,71198	0,8	0,32	5	8,3	41,5	11,07				
Tor. Ajuste	AlSi 304	Cilindrar	6,881	0,15	32409,51	1,2267032	1901,38997	0,8	0,36	6	12	72	19,2				
Tor. Ajuste	AlSi 304	Cilindrar	6,5	0,15	30615	1,26191469	1955,96777	0,8	0,3125	8	9,5	76	20,27				
Tor. Ajuste	AlSi 304	Refrentar	4	0,15	18840	1,31950791	2045,23726	0,8	0,25	2	1,1	2,2	0,59				
Tor. Ajuste	AlSi 304	Refrentar	8	0,15	37680	1,31950791	2045,23726	0,8	0,25	2	3,1	6,2	1,65				
Tor. Ajuste	AlSi 304	Avellando	4	0,15	18840	1,31950791	2045,23726	0,8	0,25	1,5	0,5	0,75	0,2				
Tor. Ajuste	AlSi 304	Refrentar	4,9	0,15	23079	1,17316068	1818,39905	0,8	0,45	1	1	1	0,27				
Tor. Ajuste	AlSi 304	Refrentar	4	0,15	18840	1,17316068	1818,39905	0,8	0,45	2	1	2	0,53				
Tor. Ajuste	AlSi 304	Refrentar	7,8	0,15	36738	1,58489319	2456,59445	0,8	0,1	0,3	0,3	0,3	0,08				
Tor. Ajuste	AlSi 304	Roscado	4,762	0,793	22429,02	1,18387625	1835,00819	0,8	0,43	1	12	12	0,61				
Tor. Ajuste	AlSi 304	Esféricado	4	0,15	18840	1,25205477	1940,6849	0,8	0,325	2	8	16	4,27				
Tor. Ajuste	AlSi 304	Esféricado	8	0,15	37680	1,27225964	1972,00244	0,8	0,3	2	2	4	1,07				
Tor. Ajuste	AlSi 304	Moleteado	-	-	-	-	-	0,8	-	1	-	-	-				

Tabla AC3.16

21. Cuerpo-válvula



Consumos de energía

Cuerpo de la válvula						
Máquina	Operación	Potencia (Kw)	Material (Kg)	T Prod (seg)	T Improd (s)	Desg. H. (gr)
Sierra	Transporte	-	-	20	-	-
	Cortar	0,186667	0,00529	0,23	-	0,06
Taladro	Cambio maq.	-	-	15	-	-
	Taladrado	0,05981	0,00425	31,5	-	0,026
Torno	Cambio Maq.	-	-	15	-	-
	Cilindrar	0,08417	0,00034	6	-	0,050
Torno	Cilindrar	0,031175	0,000748	9,17	-	0,076
Torno	Cilindrar	0,037989	0,000944	8,33	-	0,089
Torno	Conicidad	0,037629	0,00025	0,53	-	0,004
Torno	Conicidad	0,037629	0,00004	0,08	-	0,001
Torno	Conicidad	0,018537	0,00042	1,67	-	0,0039
Torno	Cambio Herr.	0,037	-	2	-	0,074
	Roscado	0,13396	0,00075	0,45	-	0,004
Torno	Cambio Herr.	0,037	-	2	-	0,074
	Refrentar	0,082784	0,00368	3,07	-	0,026
Torno	Refrentar	0,082784	0,00266	1,67	-	0,014
Torno	Cambio Herr.	0,037	-	2	-	0,074
	Cilindrar	0,085028	0,00012	3,67	-	0,031
Torno	Cilindrar	0,087078	0,003187	14,17	-	0,118
Torno	Cilindrar	0,082784	0,000275	1,33	-	0,011
Torno	Cilindrar	0,104130	0,001900	6,67	-	0,056
Torno	Tor. Forma	0,073352	0,00600	4,33	-	0,036
Torno	Cambio Herr.	0,037	-	2	-	0,074
	Ranurar	0,057252	0,000103	0,67	-	0,006
Torno	Cambio Herr.	0,037	-	2	-	0,074
	Avellanado	0,052981	0,00005	0,08	-	0,001
Torno	Avellanado	0,052981	0,00005	0,08	-	0,001
Torno	Avellanado	0,05625	0,00045	0,35	-	0,003
Torno	Avellanado	0,05625	0,00045	0,35	-	0,003
Torno	Cambio Herr.	0,037	-	2	-	0,074
	Roscado	0,455567	0,000244	0,45	-	0,004
Taladro	Cambio Maq.	-	-	15	-	-
	Taladrado	0,001631	0,000047	12,72	-	0,011
Torno	Cambio Maq.	-	-	15	-	-
	Roscado	0,186754	0,000059	0,25	-	0,002
Torno	Cambio Herr.	-	-	15	-	-
	Terminar	2,335194	0,011366	107,810581	-	0,622
Total		-	-	-	-	5,0924

Análisis de resistencia

Componente	Geometría	Tensiones principales	Tensión equivalente
Cuerpo válvula	r= 2,75 mm e= 0,15 mm	σ_m : 2,75MPa σ_i : 5,5 MPa	σ_{eq} : 4,76MPa
Criterio de plasticidad de Von Mises: $\sigma_{eq} = (\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1 \sigma_2)^{1/2}$ σ_m : tensión meridiana; $\sigma_m = P/r/2$ σ_i : tensión tangencial; $\sigma_i = P/r/e$ r: radio interior de la pieza (mm) e: espesor de la pieza (mm) P: presión de trabajo (3 bares)			

Tiempos de mecanizado

Sierra de cinta									
Pieza	Material	Operación	D (mm)	K (N/mm ²)	B (mm)	h (mm)	V (m/s)	t (seg)	
Cuer. Válvula	ASI 304	Cortar	11	640	0,7	0,5	0,66666667	0,1815	
Taladro (torno CNC DS-30Y)									
Pieza	Material	Operación	D (mm)	Fc (N/mm ²)	N (rpm)	Vc (m/min)	fn (AV/rev)	a _p -z	t (seg)
Cuerp. Válvula	ASI 304	Taladrado	1,8	2821,87451	1000	5,652	0,05	1,8205642	21
Cuerp. Válvula	ASI 304	Taladrado	0,94	2821,87451	1000	2,9516	0,05	1,8205642	8,48
Torno CNC DS-30Y									
Pieza	Material	Operación	φ (mm)	p (mm/rev)	Vc (mm/min)	a _p -z	Fc (N/mm ²)	Rend.	t (seg)
Cuer. Válvula	ASI 304	Cilindrar	3,9	0,15	18369	1,23363417	1912,13297	0,8	3,18
Cuer. Válvula	ASI 304	Cilindrar	3,4	0,15	16014	1,25694322	1946,71198	0,8	0,32
Cuer. Válvula	ASI 304	Cilindrar	3,65	0,15	17191,5	1,21998951	1890,99924	0,8	0,37
Cuer. Válvula	ASI 304	Conicidad	5	0,15	23550	1,31950791	2045,23726	0,8	0,25
Cuer. Válvula	ASI 304	Conicidad	5	0,15	23550	1,31950791	2045,23726	0,8	0,25
Cuer. Válvula	ASI 304	Conicidad	1,8	0,15	8478	1,21998951	1890,99924	0,8	0,37
Cuer. Válvula	ASI 304	Roscado	5	0,5	23550	1,2963328	2013,99758	0,8	0,27
Cuer. Válvula	ASI 304	Refrentar	11	0,15	51810	1,31950791	2045,23726	0,8	0,25
Cuer. Válvula	ASI 304	Refrentar	11	0,15	51810	1,31950791	2045,23726	0,8	0,25
Cuer. Válvula	ASI 304	Cilindrar	10,364	0,15	48914,44	1,25694322	1946,71198	0,8	0,32
Cuer. Válvula	ASI 304	Cilindrar	10	0,15	47100	1,27259664	1972,00244	0,8	0,3
Cuer. Válvula	ASI 304	Cilindrar	9,5	0,15	44745	1,2011343	1861,74267	0,8	0,25
Cuer. Válvula	ASI 304	Tor. Forma	8	0,15	37660	1,25694322	1946,71198	0,8	0,32
Cuer. Válvula	ASI 304	Avellanado	5,5	0,15	23505	1,21672666	1885,92946	0,8	0,375
Cuer. Válvula	ASI 304	Avellanado	7	0,15	32970	1,31950791	2045,23726	0,8	0,25
Cuer. Válvula	ASI 304	Avellanado	9,728	0,15	46516,88	1,23363417	1912,13297	0,8	0,35
Cuer. Válvula	ASI 304	Avellanado	9,728	0,15	46516,88	1,23363417	1912,13297	0,8	0,35
Cuer. Válvula	ASI 304	Roscado	7	0,907	46516,88	1,32488322	2053,51785	0,8	0,245
Cuer. Válvula	ASI 304	Roscado	7	0,5	32970	1,2963328	2013,99758	0,8	0,27

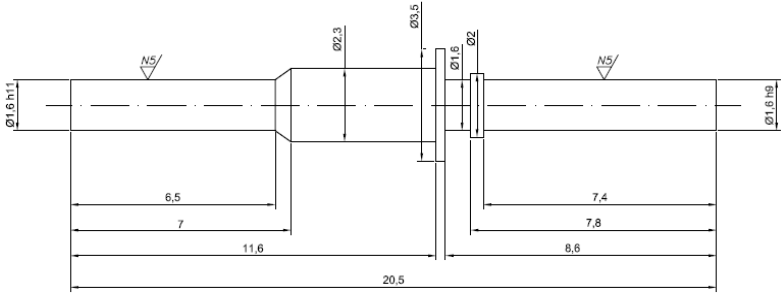
Tabla AC3.17

23. Émbolo-válvula



Consumos de energía

Émbolo de la válvula									
Máquina	Operación	Potencia (Kw)	Material (Kg)	T Prod (seg)	T Improd (s)	Desg. H. (gr)	Kw-seg		
-	Transportar	-	-	-	20	-	-	-	-
Sierra	Cortar	0,102083	0,000075	0,03	-	0,01	-	0,003063	-
-	Cambio maq.	-	-	-	15	-	-	-	-
Torno	Cilindrar	0,004055	0,000346	9	-	0,075	-	0,0365	-
Torno	Cilindrar	0,007439	0,000266	3,4	-	0,028	-	0,0253	-
Torno	Cilindrar	0,007808	0,000007	0,1	-	0,001	-	0,0008	-
Torno	Cilindrar	0,004462	0,000064	1,6	-	0,013	-	0,0071	-
Torno	Cilindrar	0,004055	0,000392	10,2	-	0,085	-	0,0414	-
Tono	Avellando	0,006494	0,000005	0,17	-	0,001	-	0,0011	-
-	Cambio Herr	0,037	-	-	2	-	-	0,074	-
Torno	Refrentar	0,003570	0,000009	0,53	-	0,004	-	0,0019	-
-	Cambio Herr	0,037	-	-	2	-	-	0,074	-
Torno	Ranurar	0,003053	0,000007	0,27	-	0,002	-	0,0008	-
-	Cambio Herr	0,037	-	-	2	-	-	0,074	-
Torno	Refrentar	0	0	0	-	0,000	-	0	-
-	Terminar	-	-	-	15	-	-	-	-
Total		0,254020	0,001171	25,2966667	56	0,22	-	0,3399	-

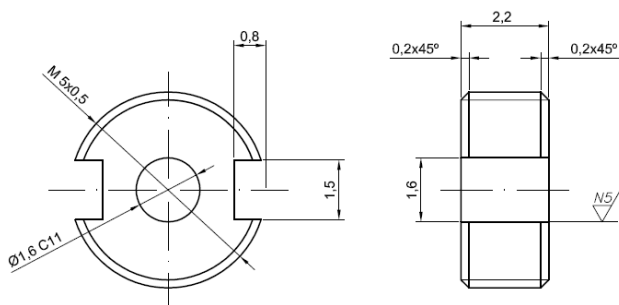


Tiempos de mecanizado

Sierra de cinta									
Pieza	Material	Operación	D (mm)	K (N/mm ²)	B (mm)	h (mm)	V (m/s)	t (seg)	
Embolo valv.	CW614N	Cortar	4	350	0,7	0,5	0,6666667	0,024	
Torno CNC ST-10									
Pieza	Material	Operación	φ (mm)	p (mm/rev)	Vc (mm/min)	a _z	Fc (N/mm ²)	Rend.	t (seg)
Embolo valv.	CW614N	Cilindrar	1,6	0,15	7536	1,43503873	717,519367	1	7,2
Embolo valv.	CW614N	Cilindrar	2,3	0,15	10833	1,29265706	646,328528	1	2,72
Embolo valv.	CW614N	Cilindrar	3,5	0,15	16485	1,51571657	757,858283	1	0,08
Embolo valv.	CW614N	Cilindrar	2	0,15	9420	1,51571657	757,858283	1	1,28
Embolo valv.	CW614N	Cilindrar	1,6	0,15	7536	1,43503873	717,519367	1	8,16
Embolo valv.	CW614N	Avellando	2,3	0,15	10833	1,37018619	685,093096	1	0,13
Embolo valv.	CW614N	Refrentar	1,6	0,15	7536	1,51571657	757,858283	1	0,43
Embolo valv.	CW614N	Refrentar	1,6	0,15	7536	1,6206586	810,328298	1	0,21

Tabla AC3.18

25. Tornillo-fijación



Consumos de energía

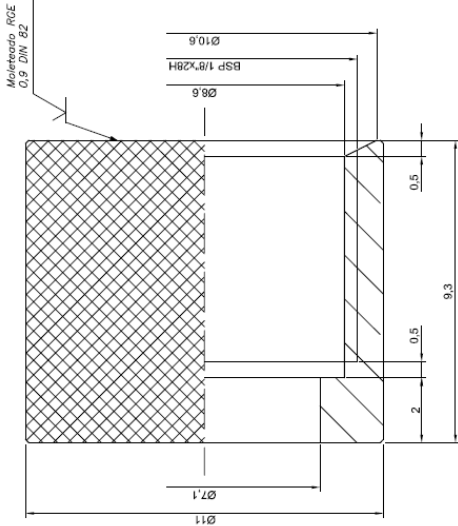
Tornillo de fijación de la válvula									
Máquina	Operación	Potencia (Kw)	Material (Kg)	T Prod (seg)	T Improd (s)	Desg. H. (gr)	Kw-seg		
-	Transportar	-	-	-	20	-	-		
Sierra	Cortar	0,102083	0,000168	0,07	-	0,02	0,006891		
-	Cambio maq.	-	-	-	15	-	-		
Taladro	Taladrado	0,002057	0,000043	3,75	-	0,003	0,0077		
-	Cambio Maq	-	-	-	15	-	-		
Torno	Cilindrar	0,000375	0,000001	0,83	-	0,007	0,0003		
-	Cambio Herr	0,037	-	-	2	-	0,074		
Torno	Cilindrar	0,012270	0,000183	1,67	-	0,014	0,0205		
-	Cambio Herr	0,037	-	-	2	-	0,074		
Torno	Roscado	0,039240	0,000045	0,25	-	0,002	0,0098		
-	Cambio Herr	0,037	-	-	2	-	0,074		
Torno	Refrentar	0,007801	0,000045	1,13	-	0,009	0,0088		
-	Cambio Herr	0,037	-	-	2	-	0,074		
Torno	Avellando	0,009542	0,000005	0,13	-	0,001	0,0013		
-	Cambio Maq	-	-	-	15	-	-		
Fresadora	Ranurado	0,006699	0,000004	2,0625	-	0,002	0,01382		
-	Terminar	-	-	-	15	-	-		
Total		0,328068	0,000495	9,90	88	0,06	0,3651		

Tiempos de mecanizado

Sierra de cinta									
Pieza	Material	Operación	D (mm)	K (N/mm ²)	B (mm)	h (mm)	V (m/s)	t (seg)	
Tor. Fij. Vál.	CW614N	Cortar	6	350	0,7	0,5	0,66666667	0,054	
Taladro (Centro de mecanizado)									
Pieza	Material	Operación	D (mm)	Fc (N/mm ²)	N (rpm)	Vc (m/min)	fn (Av/rev)	a _c ^z	t (seg)
Tor. Fij. Vál.	CW614N	Taladrado	1,6	1228,22803	1000	5,024	0,05	2,45645605	3
Torno (Centro de mecanizado)									
Pieza	Material	Operación	φ (mm)	p (mm/rev)	Vc (mm/min)	a _c ^z	Fc (N/mm ²)	Rend.	t (seg)
Tor. Fij. Vál.	CW614N	Cilindrar	1,6	0,15	7536	3,98107171	1990,53585	1	0,67
Tor. Fij. Vál.	CW614N	Cilindrar	5,5	0,15	25905	1,51571657	757,858283	1	1,33
Tor. Fij. Vál.	CW614N	Roscado	5	0,5	23550	1,48112213	740,561065	1	0,20
Tor. Fij. Vál.	CW614N	Refrentar	5	0,15	23550	1,76673992	883,36996	1	0,91
Tor. Fij. Vál.	CW614N	Avellando	5	0,15	23550	1,6206566	810,328298	1	0,11
Fresadora (Centro de mecanizado)									
Pieza	Material	Operación	φ Broca (mm)	f (mm/diente)	Z (Nº die.)	N (rpm)	a _c ^z	Vc (mm/min)	t (seg)
Tor. Fij. Vál.	CW614N	Ranurado	1	0,08	2	2000	2,1334035	6280	1,65

Tabla AC3.19

26. Tuerca-conector



Consumos de energía

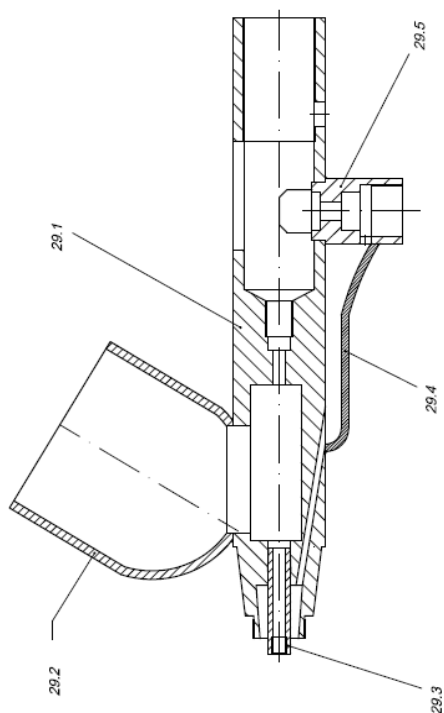
Tuerca del conector de la manguera									
Máquina	Operación	Potencia (Kw)	Material (Kg)	T Prod (seg)	T Improd (s)	Desg. H. (gr)	Kwhseg		
-	Transportar	-	-	-	20	-	-		
Sierra	Cortar	0,186667	0,000529	0,23	-	0,06	0,042350		
-	Cambio maq.	-	-	-	15	-	-		
Taladro	Taladrado	0,093056	0,003150	15	-	0,250	1,3958		
-	Cambio Maq	-	-	-	15	-	-		
Torno	Cilindrar	0,089521	0,001233	5,10	-	0,043	0,4566		
-	Cambio Herr	0,037	-	-	2	-	0,074		
Torno	Refrentar	0,108355	0,000103	0,40	-	0,003	0,0433		
Torno	Refrentar	0,108355	0,000154	0,65	-	0,005	0,0704		
-	Cambio Herr	0,037	-	-	2	-	0,074		
Torno	Cilindrar	0,031819	0,000150	2,27	-	0,019	0,0721		
-	Cambio Herr	0,037	-	-	2	-	0,074		
Torno	Roscado	0,394034	0,000366	0,75	-	0,006	0,2954		
-	Cambio Herr	0,037	-	-	2	-	0,074		
Torno	Avellando	0,076627	0,000033	0,33	-	0,003	0,0255		
-	Cambio Herr	0,037	-	-	2	-	0,074		
Torno	Moleteado	-	-	-	-	-	-		
-	Terminar	-	-	-	15	-	-		
Total		1,273434	0,005719	24,73	75	0,39	2,7716		

Tiempos de mecanizado

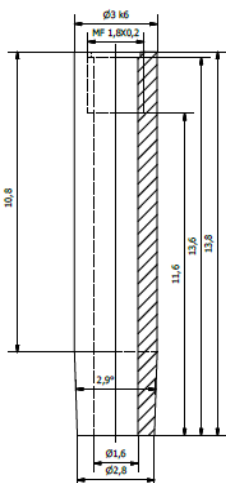
Sierra de cinta									
Pieza	Material	Operación	D (mm)	K (N/mm ²)	B (mm)	h (mm)	V (m/s)	t (seg)	
Tuer. Conect.	AISI 304	Cortar	11	640	0,7	0,5	0,66666667	0,1815	
Taladro (Torno CNC DS-30)									
Pieza	Material	Operación	D (mm)	Fc (N/mm ²)	N (rpm)	Vc (m/min)	f _n (Av./rev)	Long (mm)	t (seg)
Tuer. Conect.	AISI 304	Taladrado	7,1	2821,87451	1000	22,294	0,05	10	12
Torno CNC DS-30									
Pieza	Material	Operación	φ (mm)	p (mm/rev)	Vc (mm/min)	a _c (mm ²)	Fc (N/mm ²)	Rend.	Nº pasadas
Tuer. Conect.	AISI 304	Cilindrar	8,6	0,15	40506	1,21672868	1885,92946	0,8	2
Tuer. Conect.	AISI 304	Refrentar	11	0,15	51810	1,23363417	1912,13297	0,8	1
Tuer. Conect.	AISI 304	Refrentar	11	0,15	51810	1,23363417	1912,13297	0,8	1
Tuer. Conect.	AISI 304	Cilindrar	8,8	0,15	41448	1,58489319	2456,58445	0,8	1
Tuer. Conect.	AISI 304	Roscado	8,8	0,907	41448	1,32485022	2053,51785	0,8	2
Tuer. Conect.	AISI 304	Avellando	8,8	0,15	41448	1,27225964	1972,00244	0,8	2
Tuer. Conect.	AISI 304	Moleteado	-	-	-	-	-	-	-
									Long. Pasada
									15,3
									1,2
									1,95
									6,8
									13,6
									1
									-
									4,08
									0,32
									0,52
									1,81
									0,60
									0,27
									-

Tabla AC3.20

29. Cuerpo aerógrafo

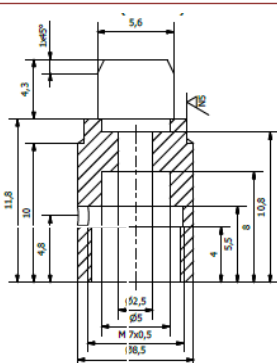


29.3. Guía de la aguja

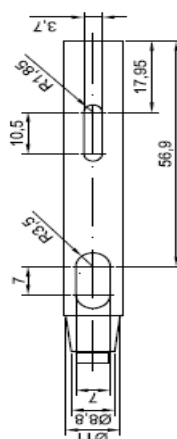
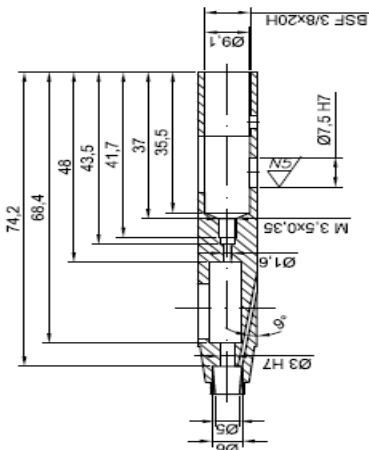
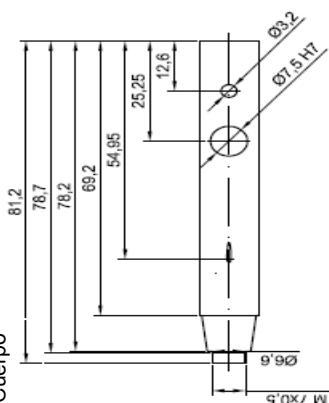


29.5.

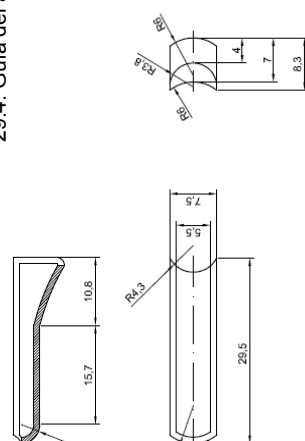
Conector-
válvula



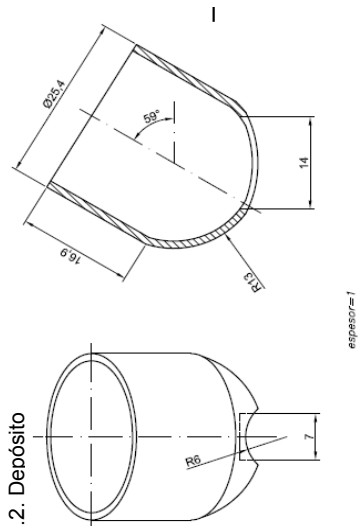
29.1. Cuerpo



29.4. Guía del aire



29.2. Depósito



espesor=1

Tabla AC3.20. Cuerpo aerógrafo - Tiempos de mecanizado

Sierra de cinta														29.1. Cuerpo			
Pieza	Material	Operación	D (mm)	K (N/mm ²)	B (mm)	h (mm)	V (m/s)	t (seg)									
Cuerpo Aero.	AISI 304	Cortar	13	640	0,7	0,5	0,66666667	0,2535									

Taladro (Torno CNC DS-30Y)													
Pieza	Material	Operación	D (mm)	Fc (N/mm ²)	N (rpm)	Vc (m/min)	fn (Av./rev)	a _c ^{-z}	Long (mm)	t (seg)			
Cuerpo Aero.	AISI 304	Taladrado	3	2821,87451	1000	9,42	0,05	1,8205642	33,6	40,32			
Cuerpo Aero.	AISI 304	Taladrado	1,6	2821,87451	1000	5,024	0,05	1,8205642	48,4	58,08			
Cuerpo Aero.	AISI 304	Taladrado	3,5	2821,87451	1000	10,99	0,05	1,8205642	43,9	52,68			
Cuerpo Aero.	AISI 304	Taladrado	7,5	2821,87451	1000	23,55	0,05	1,8205642	1,45	1,74			
Cuerpo Aero.	AISI 304	Taladrado	3,2	2821,87451	1000	10,048	0,05	1,8205642	1,45	1,74			
Cuerpo Aero.	AISI 304	Taladrado	0,8	2821,87451	1000	2,512	0,05	1,8205642	19,3	23,16			

Torno CNC DS-30Y)													
Pieza	Material	Operación	φ (mm)	p (mm/rev)	Vc (mm/min)	a _c ^{-z}	Fc (N/mm ²)	Rend.	Prof. (mm)	Nº pasadas	Long. Pasada	Long. (mm)	t (seg)
Cuerpo Aero.	AISI 304	Cilindrar	9,1	0,15	42861	1,28993668	1999,40186	0,8	0,28	10	35,9	359	95,73
Cuerpo Aero.	AISI 304	Conicidad	3,5	0,15	16485	1,28993668	1999,40186	0,8	0,28	5,5	1,5	8,25	2,2
Cuerpo Aero.	AISI 304	Roscado	3,5	0,35	16485	1,39542866	2162,91443	0,8	0,189	1	4,7	4,7	0,54
Cuerpo Aero.	AISI 304	Roscado	9,1	0,4	42861	1,36633169	2117,81412	0,8	0,21	1	16,1	16,1	1,61
Cuerpo Aero.	AISI 304	Cilindrar	12,5	0,15	58875	1,31950791	2045,23726	0,8	0,25	2	82	164	43,73
Cuerpo Aero.	AISI 304	Refrentar	12	0,15	56520	1,37972966	2138,58098	0,8	0,2	2	1,45	2,9	0,77
Cuerpo Aero.	AISI 304	Refrentar	12	0,15	56520	1,37972966	2138,58098	0,8	0,2	2	4,5	9	2,4
Cuerpo Aero.	AISI 304	Cilindrar	5	0,15	23550	1,31950791	2045,23726	0,8	0,25	4	7	28	7,47
Cuerpo Aero.	AISI 304	Conicidad	5	0,15	23550	1,31950791	2045,23726	0,8	0,25	1,5	7	10,5	2,8
Cuerpo Aero.	AISI 304	Cilindrar	11	0,15	58180	1,31950791	2045,23726	0,8	0,25	2	12	24	6,4
Cuerpo Aero.	AISI 304	Cilindrar	7	0,15	32970	1,31950791	2045,23726	0,8	0,25	8	3	24	6,4
Cuerpo Aero.	AISI 304	Conicidad	11	0,15	58180	1,2267032	1901,38997	0,8	0,36	2	9	18	4,8
Cuerpo Aero.	AISI 304	Roscado	7	0,5	32970	1,29935328	2013,99758	0,8	0,27	1	2,5	2,5	0,2
Cuerpo Aero.	AISI 304		6,6	0,15	31086	1,37972966	2138,58098	0,8	0,2	1	0,5	0,5	0,13

Fresadora (Torno CNC DS-30Y)																
Pieza	Material	Operación	φ Broca (mm)	f (mm/diente)	Z (Nº die.)	N (rpm)	a _c ^{-z}	Vc (mm/min)	L (mm)	d (mm)	Fc (N/mm ²)	Nº pasadas	Long. Pasada	Long. (mm)	Vf (mm/min)	t (seg)
Cuerpo Aero.	AISI 304	Ranurado	3,7	0,05	3	2000	1,8205642	23236	0,9	0,05	2821,87451	1	11,4	11,4	300	2,28
Cuerpo Aero.	AISI 304	Ranurado	7	0,05	3	2000	1,8205642	43960	0,9	0,05	2821,87451	1	7,9	7,9	300	1,58
Cuerpo Aero.	AISI 304	Escariado	7	0,05	3	2000	1,8205642	43960	1	0,05	2821,87451	16	14	224	300	44,8
Cuerpo Aero.	AISI 304	Escariado	7	0,05	3	2000	1,8205642	43960	1	0,05	2821,87451	8	8	64	300	12,8

Cizalla y Prensa hidráulica														29.2. Depósito			
Pieza	Material	Operación	e (mm)	l (mm)	V (m/s)	Fc (N/mm ²)	K	D _p (mm)	D ₀ (mm)	t (seg)							
Depósito	AISI 304	Cortar	1,5	235,5	0,011	310	0,7			1							
Depósito	AISI 304	Embutir	1,5		0,011	310	0,7	39	74	2							
Depósito	AISI 304	Troquelado	1,5	42	0,011	310	0,7			1							

Torno (Centro de mecanizado)													
Pieza	Material	Operación	φ (mm)	p (mm/rev)	Vc (mm/min)	a _c ^{-z}	Fc (N/mm ²)	Rend.	Prof. (mm)	Nº pasadas	Long. Pasada	Long. (mm)	t (seg)
Depósito	AISI 304	Cilindrar	25,4	0,15	119634	1,58489319	2456,58445	0,8	0,1	1	17	17	4,53333333
Depósito	AISI 304	Cilindrar	23,4	0,15	110214	1,58489319	2456,58445	0,8	0,1	1	17	17	4,53333333

Fresadora (Centro de mecanizado)																
Pieza	Material	Operación	φ Broca (mm)	f (mm/diente)	Z (Nº die.)	N (rpm)	a _c ^{-z}	Vc (mm/min)	L (mm)	d (mm)	Fc (N/mm ²)	Nº pasadas	Long. Pasada	Long. (mm)	Vf (mm/min)	t (seg)
Depósito	AISI 304	Ranurado	7	0,05	3	2000	1,8205642	43960	1,75	0,05	2821,87451	4	1	4	300	0,8

Soldadura													
Piezas a unir	Material		e (mm)	l (mm)	V (v)	I (A)	V (mm/s)	M (g/mm)	t (seg)				
Depósito al cuerpo	AISI 304		1,5	42	230	35	11,6666667	0,078	-				

Sierra de cinta														29.3. Guía de la aguja			
Pieza	Material	Operación	D (mm)	K (N/mm ²)	B (mm)	h (mm)	V (m/s)	t (seg)									
Guía Aguja	CW614N	Cortar	3,5	350	0,7	0,5	0,66666667	0,018375									

Taladro (Torno CNC ST-10)													
Pieza	Material	Operación	D (mm)	Fc (N/mm ²)	N (rpm)	Vc (m/min)	fn (Av./rev)	a _c ^{-z}	Long (mm)	t (seg)			
Guía Aguja	CW614N	Taladrado	1,6	1228,22803	1000	5,024	0,05	2,45645605	14	16,8			

Torno CNC ST-10													
Pieza	Material	Operación	φ (mm)	p (mm/rev)	Vc (mm/min)	a _c ^{-z}	Fc (N/mm ²)	Rend.	Prof. (mm)	Nº pasadas	Long. Pasada	Long. (mm)	t (seg)
Guía Aguja	CW614N	Cilindrar	3,25	0,15	15307,5	1,51571657	757,858283	0,8	0,25	1	14	14	3,73
Guía Aguja	CW614N	Cilindrar	1,8	0,15	8478	1,99526231	997,631157	0,8	0,1	1	0,2	0,2	0,05
Guía Aguja	CW614N	Conicidad	3	0,15	14130	1,99526231	997,631157	0,8	0,1	1	3	3	0,80
Guía Aguja	CW614N	Refrentar	3	0,15	14130	1,99526231	997,631157	0,8	0,1	1	0,6	0,6	0,16
Guía Aguja	CW614N	Refrentar	2,8	0,15	13188	1,99526231	997,631157	0,8	0,1	1	0,6	0,6	0,16
Guía Aguja	CW614N	Roscado	1,8	0,15	8478	1,94972281	974,861407	0,8	0,108	1	2	2	0,53

Cizalla hidráulica														29.4. Guía de aire			
Pieza	Material	Operación	e (mm)	l (mm)	σ (N/mm ²)	V (mm/s)	K	t (seg)									
Guía del aire	AISI 304	Cortar	1,5	1000	310	10	0,75	1									
Guía del aire	AISI 304	Cortar	1,5	31,5	310	10	0,75	1									

Prensa hidráulica													
Pieza	Material	Operación	e (mm)	l (mm)	V (m/s)	Fc (N/mm ²)	K	t (seg)					
Guía del aire	AISI 304	Troquelado	1,5	88,8	0,011	310	0,7	1					

Dobladora (Prensa hidráulica)													
Pieza	Material	Operación	e (mm)	l (mm)	σ (N/mm ²)	V (mm/s)	K	Wd (mm)	t (seg)				
Guía del aire	AISI 304	Doblado	1,5	31,5	310	11	0,25	7,5	1				

Fresadora (Centro de mecanizado)																
Pieza	Material	Operación	φ Broca (mm)	f (mm/diente)	Z (Nº die.)	N (rpm)	a _c ^{-z}	Vc (mm/min)	L (mm)	d (mm)	Fc (N/mm ²)	Nº pasadas	Long. Pasada	Long. (mm)	Vf (mm/min)	t (seg)
Guía del aire	AISI 304	Rebaje	7,5	0,02	3	2000	2,18672415	47100	7,5	0,02	3389,42243	1	1,3	1,3	120	0,65
Guía del aire	AISI 304	Rebaje	7,5	0,02	3	2000	2,18672415	47100	7,5	0,02	3389,42243	1	2,19	2,19	120	1,095

Soldadura													
Piezas a unir	Material		e (mm)	l (mm)	V (v)	I (A)	V (mm/s)	M (g/mm)	t (seg)				
Guía a Cuerpo	AISI 304		1,5	90,6	230	35	11,6666667	0,078	-				

Sierra de cinta														29.5. Conector-válvula			
Pieza	Material	Operación	D (mm)	K (N/mm ²)	B (mm)	h (mm)	V (m/s)	t (seg)									
Conector a-v	AISI 304	Cortar	9	640	0,7	0,5	0,66666667	0,1215									

Taladro (Torno CNC DS-30Y)													
Pieza	Material	Operación	D (mm)	Fc (N/mm ²)	N (rpm)	Vc (m/min)	fn (Av./rev)	a _c ^{-z}	Long (mm)	t (seg)			
Conector a-v	AISI 304	Taladrado	2,5	2821,87451	1000	7,85	0,05	1,8205642	17	20,4			
Conector a-v	AISI 304	Taladrado	1,4	2821,87451	1000	4,396	0,05	1,8205642	0,65	0,78			

Torno CNC DS-30Y													
Pieza	Material	Operación	φ (mm)	p (mm/rev)	Vc (mm/min)	a _c ^{-z}	Fc (N/mm ²)	Rend.	Prof. (mm)	Nº pasadas	Long. Pasada	Long. (mm)	t (seg)
Conector a-v	AISI 304	Cilindrar	6,8	0,15	32028	1,30051135	2015,79259	0,8	0,2688	8	5,95	47,6	12,69
Conector a-v	AISI 304	Cilindrar	5	0,15	23550	1,26151126	1955,34246	0,8	0,313	4	2,5	10	2,67
Conector a-v	AISI 304	Cilindrar	5	0,15	23550	1,26151126	1955,34246	0,8	0,313	4	6,2	24,8	6,61
Conector a-v	AISI 305	Roscado	6,8	0,5	32028	1,29935328	2013,99758	0,8	0,27	1	4	4	0,32
Conector a-v	AISI 304	Cilindrar	8,5	0,15	40035	1,31950791	2045,23726	0,8	0,25	1	17	17	4,53
Conector a-v	AISI 304	Refrentar	8,5	0,15	40035	1,34760774	2088,792	0,8	0,225	2	1,75	3,5	0,93
Conector a-v	AISI 304	Refrentar	8,5	0,15	40035	1,34760774	2088,792	0,8	0,225	2	0,85	1,7	0,45
Conector a-v	AISI 304	Cilindrar	7,5	0,15	35325	1,31950791	2045,23726	0,8	0,25	2	4,3	8,6	2,29

Fresadora (Torno CNC DS-30Y)																
Pieza	Material	Operación	φ Broca (mm)	f (mm/diente)	Z (Nº die.)	N (rpm)	a _c ^{-z}	Vc (mm/min)	L (mm)	d (mm)	Fc (N/mm ²)	Nº pasadas	Long. Pasada	Long. (mm)	Vf (mm/min)	t (seg)
Conector a-v	AISI 304	Ranurar	5	0,07	4	2000	1,70208166	31400	5	0,07	2638,22657	1	7,5	7,5	560	0,80
Conector a-v	AISI 304	Avellando	5	0,07	4	2000	1,70208166	31400	1	0,07	2638,22657	1	1	1	560	0,11
Conector a-v	AISI 304	Cilindrado	12	0,055	3	2000	1,78618921	75360	1	0,055	2768,59328	2	3,6	7,2	330	1,31

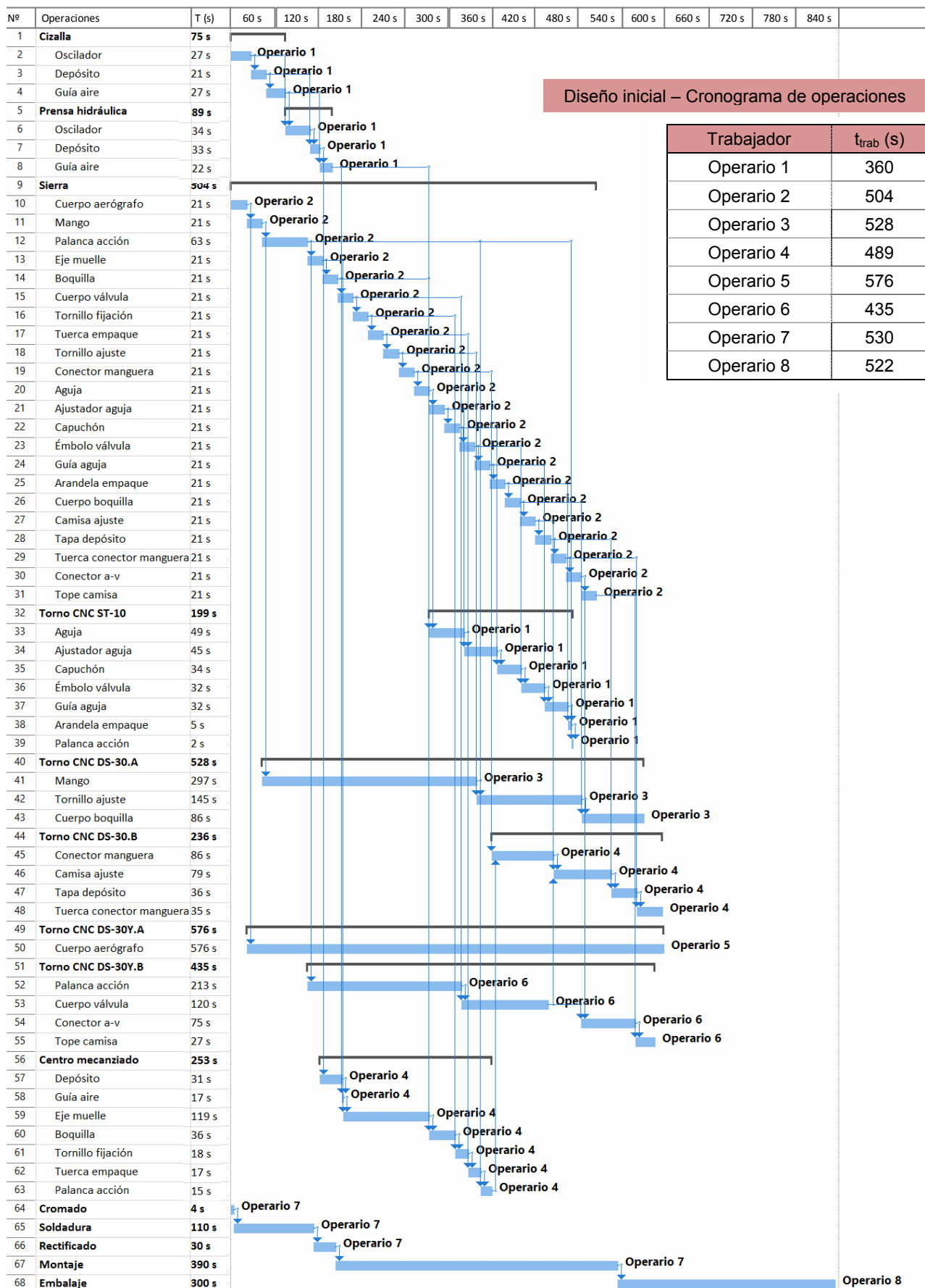
Soldadura													
Piezas a unir	Material		e (mm)	l (mm)	V (v)	I (A)	V (mm/s)	M (g/mm)	t (seg)				
Conector a cuerpo	AISI 304		1,5	44,1786467	230	35	11,6666667	0,078	-				

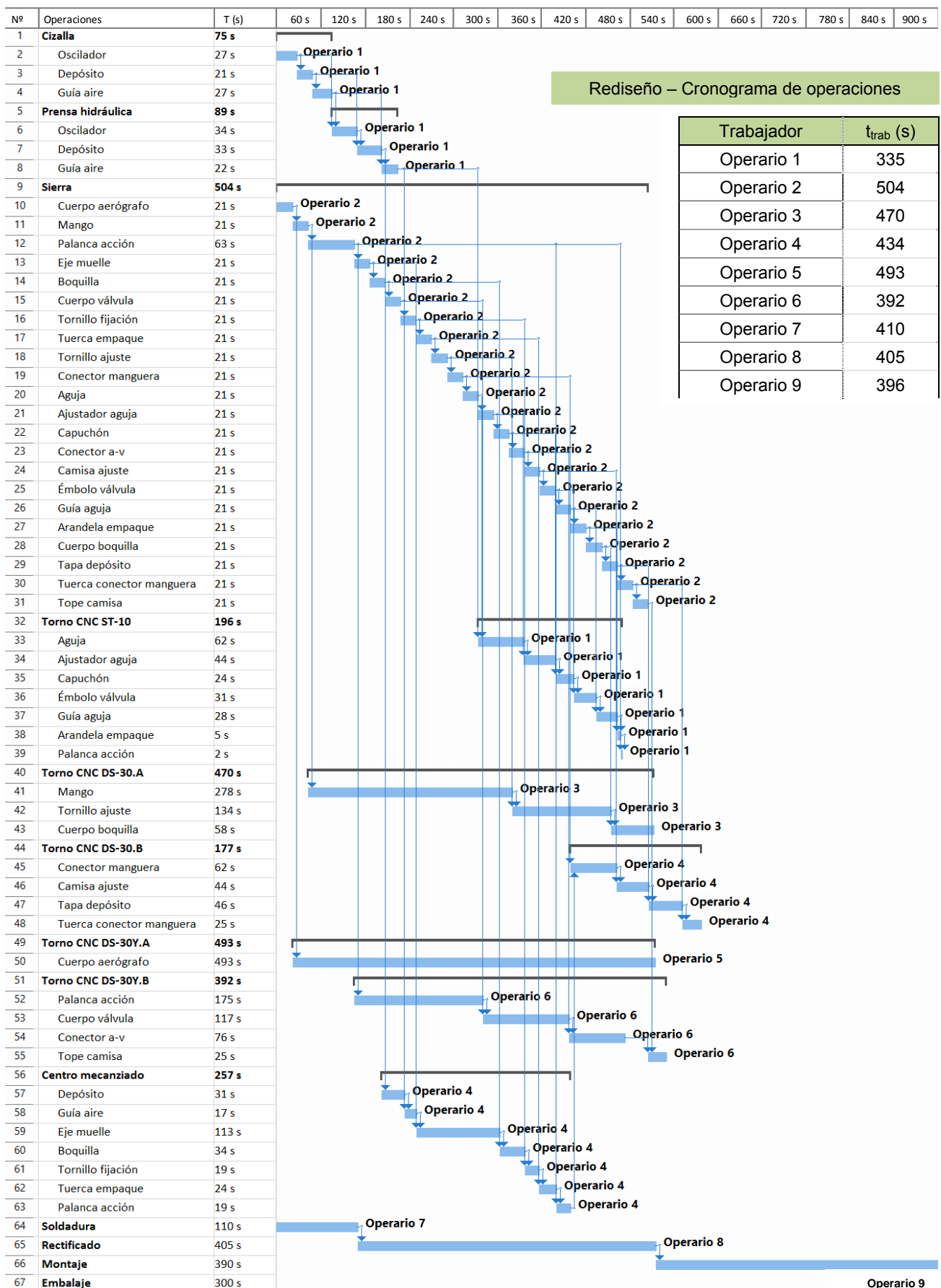
Tabla AC3.20. Cuerpo aerógrafo - Consumos de energía

Cuerpo del aerógrafo									
Máquina	Operación	Potencia (Kw)	Material (Kg)	T Prod (seg)	T Improd (s)	Desg. H. (gr)	Kw-seg		
-	Transportar	-	-	-	20	-	-	-	-
Sierra	Cortar	0.186667	0.000739	0.32	-	0.08	0.059150	-	-
-	Cambio maq.	-	-	-	15	-	-	-	-
Taladro	Taladrado	0.016614	0.001890	50.40	-	0.126	0.8373	-	-
-	Cambio Herr	-	-	-	10	-	-	-	-
Taladro	Taladrado	0.004726	0.000774	72.60	-	0.061	0.3431	-	-
-	Cambio Herr	-	-	-	10	-	-	-	-
Taladro	Taladrado	0.022613	0.003360	65.85	-	0.274	1.4891	-	-
-	Cambio Maq	-	-	-	15	-	-	-	-
Tomo	Cilindrar	0.074984	0.022863	119.67	-	0.997	8.9731	-	-
Tomo	Conicidad	0.028840	0.000101	2.75	-	0.023	0.0793	-	-
-	Cambio Herr	0.037	-	-	2	-	0.074	-	-
Tomo	Roscado	0.049138	0.000039	0.67	-	0.006	0.0330	-	-
-	Cambio Herr	0.037	-	-	2	-	0.074	-	-
Tomo	Roscado	0.158850	0.000385	2.01	-	0.017	0.3197	-	-
-	Cambio Herr	0.037	-	-	2	-	0.074	-	-
Tomo	Cilindrar	0.094073	0.012810	54.67	-	0.456	5.1427	-	-
-	Cambio Herr	0.037	-	-	2	-	0.074	-	-
Tomo	Refrentar	0.075545	0.000153	0.97	-	0.008	0.0730	-	-
Tomo	Refrentar	0.075545	0.000337	3	-	0.025	0.2266	-	-
-	Cambio Herr	0.037	-	-	2	-	0.074	-	-
Tomo	Cilindrar	0.037629	0.000875	9.33	-	0.078	0.3512	-	-
Tomo	Conicidad	0.037629	0.000164	3.50	-	0.029	0.1317	-	-
-	Cambio Herr	0.037	-	-	2	-	0.074	-	-
Tomo	Cilindrar	0.082784	0.001650	8	-	0.067	0.6623	-	-
Tomo	Cilindrar	0.052881	0.001050	8	-	0.087	0.4214	-	-
Tomo	Conicidad	0.110825	0.000891	6	-	0.050	0.6649	-	-
-	Cambio Herr	0.037	-	-	2	-	0.074	-	-
Tomo	Roscado	0.186754	0.000059	0.25	-	0.002	0.0467	-	-
-	Cambio Herr	0.037	-	-	2	-	0.074	-	-
Tomo	Ranurar	0.041550	0.000016	0.17	-	0.001	0.0069	-	-
-	Cambio Maq	-	-	-	15	-	-	-	-
Taladro	Taladrado	0.103836	0.000510	2.18	-	0.020	0.2258	-	-
-	Cambio Herr	-	-	-	10	-	-	-	-
Taladro	Taladrado	0.018903	0.000093	2.18	-	0.005	0.0411	-	-
-	Cambio Herr	-	-	-	10	-	-	-	-
Taladro	Taladrado	0.001181	0.000077	28.95	-	0.024	0.0342	-	-
-	Cambio Maq	-	-	-	15	-	-	-	-
Fresadora	Ranurado	0.049177	0.000005	2.85	-	0.005	0.1402	-	-
-	Cambio Herr	0.037	-	-	2	-	-	-	-
Fresadora	Ranurado	0.093037	0.000004	1.98	-	0.005	0.1837	-	-
Fresadora	Escariado	0.103375	0.000089	56	-	0.140	5.7890	-	-
Fresadora	Escariado	0.103375	0.000025	16	-	0.040	1.6540	-	-
-	Terminar	-	-	-	15	-	-	-	-
Total		2.143332	0.048959	518.28	153	2.60	28.5213	-	-
Depósito									
Máquina	Operación	Potencia (Kw)	Material (Kg)	T Prod (seg)	T Improd (s)	Desg. H. (gr)	Kw-seg		
-	Transportar	-	-	-	20	-	-	-	-
Cizalla	Cortar	0.843208	0	1	-	-	0.843208	-	-
-	Cambio Herr	-	-	-	10	-	-	-	-
Presna	Embutir	0.750053	0	2	-	-	1.500107	-	-
-	Cambio Herr	-	-	-	10	-	-	-	-
Presna	Troquelado	0.150381	0.001170	1	-	-	0.150381	-	-
-	Cambio Maq	-	-	-	15	-	-	-	-
Tomo	Cilindrar	0.091841	0.001079	5.7	-	0.094	0.520432	-	-
-	Cambio Herr	0.037	-	-	3	-	0.111	-	-
Tomo	Cilindrar	0.084609	0.000994	5.7	-	0.094	0.479453	-	-
-	Cambio Maq	-	-	-	15	-	-	-	-
Fresadora	Ranurado	0.180906	0.000003	1.0	-	0.030	0.180906	-	-
-	Terminar	-	-	-	15	-	-	-	-
Total		2.137998	0.003246	16.3	88.0	0.219	3.785486	-	-

Guía de la aguja									
Máquina	Operación	Potencia (Kw)	Material (Kg)	T Prod (seg)	T Improd (s)	Desg. H. (gr)	Kw-seg		
-	Transportar	-	-	-	20	-	-	-	-
Sierra	Cortar	0.102083	0.000057	0.88	-	0.22	0.089323	-	-
-	Cambio maq.	-	-	-	15	-	-	-	-
Taladro	Taladrado	0.002057	0.000239	21.00	-	0.018	0.0432	-	-
-	Cambio Maq	-	-	-	15	-	-	-	-
Tomo	Cilindrar	0.009063	0.000304	4.67	-	0.039	0.0423	-	-
Tomo	Cilindrar	0.002843	0.000001	0.07	-	0.001	0.0002	-	-
Tomo	Conicidad	0.004405	0.000012	1	-	0.008	0.0044	-	-
-	Cambio Herr	0.037	-	-	2	-	0.074	-	-
Tomo	Refrentar	0.004405	0.000008	0.20	-	0.002	0.0009	-	-
Tomo	Refrentar	0.004111	0.000007	0.2	-	0.002	0.0008	-	-
-	Cambio Herr	0.037	-	-	2	-	0.074	-	-
Tomo	Roscado	0.002789	0.000005	0.67	-	0.006	0.0019	-	-
-	Terminar	-	-	-	15	-	-	-	-
Total		0.205558	0.000633	28.68	69	0.29	0.3310	-	-
Guía del aire									
Máquina	Operación	Potencia (Kw)	Material (Kg)	T Prod (seg)	T Improd (s)	Desg. H. (gr)	Kw-seg		
-	Transporte	-	-	-	20	-	-	-	-
Cizalladora	Cortar	0.058125	0	1	-	-	0.058125	-	-
-	Preparar	-	-	-	5	-	-	-	-
Cizalladora	Cortar	0.001831	0	1	-	-	0.001831	-	-
-	Cambio Maq	-	-	-	15	-	-	-	-
Presna	Troquelado	0.317948	0.000131	1	-	-	0.317948	-	-
-	Cambio Maq	-	-	-	15	-	-	-	-
Dobladora	Doblado	0.0001343	0	1	-	-	0.0001343	-	-
-	Cambio Maq	-	-	-	15	-	-	-	-
Fresadora	Rebaje	0.399104	0.000049	0.8125	-	0.024	0.324272	-	-
Fresadora	Rebaje	0.399104	0.000082	1.36875	-	0.041	0.546274	-	-
-	Terminar	-	-	-	15	-	-	-	-
Total		1.176248	0.000262	6.18125	85	0.07	1.248585	-	-
Conector aerógrafo-válvula									
Máquina	Operación	Potencia (Kw)	Material (Kg)	T Prod (seg)	T Improd (s)	Desg. H. (gr)	Kw-seg		
-	Transportar	-	-	-	20	-	-	-	-
Sierra	Cortar	0.186667	0.000354	0.15	-	0.04	0.028350	-	-
-	Cambio maq.	-	-	-	15	-	-	-	-
Taladro	Taladrado	0.011537	0.000664	25.50	-	0.064	0.2942	-	-
-	Cambio Maq	-	-	-	15	-	-	-	-
Tomo	Cilindrar	0.054232	0.002175	15.87	-	0.132	0.8605	-	-
Tomo	Cilindrar	0.045041	0.000391	3.33	-	0.028	0.1501	-	-
Tomo	Cilindrar	0.045041	0.000970	8.27	-	0.069	0.3723	-	-
-	Cambio Herr	0.037	-	-	2	-	0.074	-	-
Tomo	Roscado	0.181418	0.000092	0.40	-	0.003	0.0726	-	-
-	Cambio Herr	0.037	-	-	2	-	0.074	-	-
Tomo	Cilindrar	0.063970	0.000903	5.67	-	0.047	0.3625	-	-
-	Cambio Herr	0.037	-	-	2	-	0.074	-	-
Tomo	Refrentar	0.058799	0.000133	1.17	-	0.010	0.0686	-	-
Tomo	Refrentar	0.058799	0.000073	0.57	-	0.005	0.0333	-	-
-	Cambio Maq	-	-	-	15	-	-	-	-
Taladro	Taladrado	0.003618	0.000008	0.98	-	0.002	0.0035	-	-
-	Cambio Maq	-	-	-	15	-	-	-	-
Tomo	Cilindrar	0.056444	0.000403	2.87	-	0.024	0.1618	-	-
-	Cambio Maq	-	-	-	15	-	-	-	-
Fresadora	Ranurar	0.483235	0.000021	1.00	-	0.008	0.4854	-	-
Fresadora	Avelland	0.096647	0.000001	0.13	-	0.001	0.01294	-	-
-	Cambio Herr	0.037	-	-	2	-	0.074	-	-
Fresadora	Cilindrado	0.191254	0.000003	1.64	-	0.018	0.3130	-	-
-	Terminar	-	-	-	15	-	-	-	-
Total		1.684702	0.006190	67.53	118	0.45	3.5151	-	-

Anexo C3 - 2. Planificación de operaciones de fabricación





Anexo C3 - 3. Cálculo de indicadores

La obtención de indicadores ambientales se apoya en bases de datos existentes. En este caso se han utilizado los datos de Probas (**UBA, 2007**) y de la metodología MEEuP (**Kemna et al., 2005**). El99 fue obtenido del correspondiente manual para diseñadores (**VROM, 2000**). En la Tabla AC3.21, se enumeran los respectivos indicadores unitarios para cada una de las entradas del proceso y las bases de datos consultadas en cada caso. Se han utilizado los siguientes indicadores ambientales: GE (Global Energy), GWP (Global Warming Potential), EI99 (Eco-indicador 99).

Tabla AC3.21. Aerógrafo - Indicadores ambientales unitarios.

Entrada	GE (MJ/Kg)	GWP ₁₀₀ (KgCO ₂ -eq/Kg)	EI99 (pt/Kg)	Base de datos
Acero S275JR	8,03	0,61	170	Probas
AISI 304N	20,24	1,5	840	Probas
Al 6066-O	26,68	1,86	60	Probas
CW614N	16,96	1,11	752	Probas
Cromo	484,37	26,26	970	Probas
Metal duro	56,51	3,42	880	Probas
PTFE	27,27	0,65	160	MEEuP
PVC	6,8	1,18	100	MEEuP
PUR	54,2	3,5	200	MEEuP
EPDM	93,58	3,28	120	Probas
Madera	18,18	0,249	30,7	Probas
Papel	74,94	0,546	30	Probas
Electricidad	2,23	348,6	22000	Probas

A partir de los indicadores unitarios y de los datos obtenidos en el inventario de producción, se calculan los indicadores de impacto ambiental. El cálculo del impacto se ha dividido en dos bloques: materiales en el producto y proceso de fabricación. El bloque materiales en el producto considera la masa de cada material en el producto final e implica la evaluación del impacto teniendo en cuenta el proceso de obtención de ese material y el potencial de reciclaje en la etapa final de tratamiento. El bloque de proceso de fabricación incluye material desechado, energía y consumibles.

En las siguientes tablas se muestran los indicadores ambientales calculados en cada uno de estos bloques. En la Tabla AC3.22 los indicadores correspondientes al diseño inicial del aerógrafo y en las Tabla AC3.23 y AC3.24, los obtenidos en cada uno de los ciclos de rediseño. En el diseño inicial se puede observar que la contribución al impacto del bloque proceso de fabricación es superior a la de los materiales del producto, debido, en gran parte, a la elevada cantidad de material desechado. En los productos rediseñados, la contribución al impacto ambiental del bloque materiales en el producto es menor.

Tabla AC3.22. Aerógrafo - Diseño inicial. Indicadores ambientales.

Entrada	Material	Masa (Kg·10 ⁻³)	GE (MJ)	GWP ₁₀₀ (KgCO ₂ -eq)	EI99 (mPt)
Componentes	AISI 304	157	3,18	0,235	131,9
Componentes	CW614N	4,1	0,07	4·10 ⁻³	3
Componentes	PTFE	0,023	6·10 ⁻⁴	2·10 ⁻⁵	4·10 ⁻³
Componentes	EPDM	0,075	7·10 ⁻³	2·10 ⁻⁴	9·10 ⁻³
Acabado	Cromo	7,4	3,58	0,19	7,2
Tornillería	S275JR	0,015	1·10 ⁻⁴	9·10 ⁻⁶	3·10 ⁻³
Embalaje	Varios	350	3,84	0,37	111,4
Materiales producto	Total		10,67	0,8	253,4
Mat. desechado	AISI 304	204	4,13	0,31	171,4
Mat. desechado	CW614N	6	0,09	6·10 ⁻³	4,3
Mat. desechado	PTFE	0,046	10 ⁻³	3·10 ⁻⁵	7·10 ⁻³
Mat. desechado	Cromo	15	7,27	0,39	14,6
Herramientas	Metal duro	16	0,9	0,05	14,1
Energía	0,033 Kwh		7,5·10 ⁻⁴	0,117	7,4
Proceso fabricación	Total		12,4	0,88	211,7
TOTAL			23,07	1,68	465,1

Tabla AC3.23. Aerógrafo - Ciclo 1 de rediseño. Indicadores ambientales.

Entrada	Material	Masa (Kg·10 ⁻³)	GE (MJ)	GWP ₁₀₀ (KgCO ₂ -eq)	EI99 (mPt)
Componentes	AISI 304	157	3,18	0,23	131,9
Componentes	CW614N	4,1	0,07	4·10 ⁻³	3
Componentes	PTFE	0,023	6·10 ⁻⁴	2·10 ⁻⁵	4·10 ⁻³
Componentes	EPDM	0,075	7·10 ⁻³	2·10 ⁻⁴	9·10 ⁻³
Tornillería	S275JR	0,015	1·10 ⁻⁴	9·10 ⁻⁶	3·10 ⁻³
Embalaje	Varios	350	3,84	0,37	111,4
Materiales producto	Total		7,09	0,61	246,3
Mat. desechado	AISI 304	156	3,15	0,23	131,1
Mat. desechado	CW614N	4	0,07	5·10 ⁻³	3,16
Mat. desechado	PTFE	0,015	4·10 ⁻⁴	9·10 ⁻⁶	2·10 ⁻³
Herramientas	Metal duro	16	0,9	0,05	14,1
Energía	0,0062 Kwh		7,5·10 ⁻⁴	0,021	1,37
Proceso fabricación	Total		4,13	0,32	149,7
TOTAL			11,22	0,93	396

Tabla AC3.24. Aerógrafo - Ciclo 2 de rediseño. Indicadores ambientales.

Entrada	Material	Masa (Kg·10 ⁻³)	GE (MJ)	GWP ₁₀₀ (KgCO ₂ -eq)	EI99 (mPt)
Componentes	AI 6066-O	56,6	1,51	0,105	3,4
Componentes	PTFE	0,023	6·10 ⁻⁴	2·10 ⁻⁵	4·10 ⁻³
Componentes	EPDM	0,075	7·10 ⁻³	2·10 ⁻⁴	9·10 ⁻³
Tornillería	S275JR	0,015	1·10 ⁻⁴	9·10 ⁻⁶	3·10 ⁻³
Embalaje	Varios	420	6,02	0,2	99,52
Materiales producto	Total		7,53	0,31	102,9
Mat. desechado	AI 6066-O	55,2	1,47	0,1	3,32
Mat. desechado	PTFE	0,015	4·10 ⁻⁴	9·10 ⁻⁶	2·10 ⁻³
Herramientas	Metal duro	14	0,79	0,05	12,3
Energía	0,00077 Kwh		1,7·10 ⁻⁵	0,0026	0,17
Proceso fabricación	Total		2,27	0,15	15,8
TOTAL			9,81	0,46	118,7

Anexo C3 - 4. Costes de producción

Mediciones de materia prima

Diseño inicial	
Materia prima	L (mm)
AISI 304N	
Barra Ø2 mm	131
Barra Ø3 mm	7
Barra Ø5,5 mm	42
Barra Ø7 mm	11
Barra Ø8 mm	6
Barra Ø9 mm	77
Barra Ø10 mm	29
Barra Ø11 mm	32
Barra Ø12 mm	18
Barra Ø13 mm	139
Barra Ø28 mm	8
CW614N	
Barra Ø2 mm	4
Barra Ø3,5 mm	14
Barra Ø4 mm	39
Barra Ø6 mm	3
Barra Ø10 mm	5
PTFE	
Barra Ø4 mm	3
AISI 304N	
Chapa e=1,5 mm	3

Ciclo 1 de rediseño	
Materia prima	L (mm)
AISI 304N	
Barra Ø2 mm	131
Barra Ø3 mm	7
Barra Ø5 mm	42
Barra Ø7 mm	11
Barra Ø8 mm	36
Barra Ø9 mm	10
Barra Ø10 mm	21
Barra Ø11 mm	18
Barra Ø12 mm	83
Barra Ø27 mm	8
CW614N	
Barra Ø2 mm	4
Barra Ø3 mm	14
Barra Ø4 mm	38
Barra Ø5 mm	3
AISI 304N	
Tubo Ø7x1,5 mm	6
Tubo Ø9x3,25 mm	17
Tubo Ø9x3,5 mm	23
Tubo Ø10x4 mm	19
Tubo Ø11x2 mm	10
Tubo Ø12x4 mm	59
CW614N	
Tubo Ø10x2,5 mm	6
PTFE	
Barra Ø3 mm	3
AISI 304N	
Chapa e=1,5 mm	3

Ciclo 2 de rediseño	
Materia prima	L (mm)
Al 6066-O	
Barra Ø2 mm	135
Barra Ø3 mm	21
Barra Ø4 mm	38
Barra Ø5 mm	45
Barra Ø7 mm	11
Barra Ø8 mm	36
Barra Ø9 mm	10
Barra Ø10 mm	21
Barra Ø11 mm	18
Barra Ø12 mm	83
Barra Ø27 mm	8
Al 6066-O	
Tubo Ø7x1,5 mm	6
Tubo Ø9x3,25 mm	17
Tubo Ø9x3,5 mm	23
Tubo Ø10x2,5 mm	6
Tubo Ø10x4 mm	19
Tubo Ø11x2 mm	10
Tubo Ø12x4 mm	59
PTFE	
Barra Ø3 mm	3
AISI 304N	
Chapa e=1,5 mm	3

Costes de materia prima (C_{MP})

Material	M _{MP} (g)	Precio (€/Kg)	C _{MPmat} (€)
AISI 304	361	5,16	1,86
CW614N	10,1	3,99	0,04
PTFE	0,07	365,3	0,03
Cromo	22,4 ml	53,57	1,2
Elementos comerciales			1,21
Total			4,34

Material	M _{MP} (g)	Precio (€/Kg)	C _{MPmat} (€)
AISI 304	315,9	5,16	1,63
CW614N	8,5	3,99	0,03
PTFE	0,038	365,3	0,015
Elementos comerciales			1,21
Total			2,88

Material	M _{MP} (g)	Precio (€/Kg)	C _{MPmat} (€)
Al 6066-O	111,8	9,85	1,10
PTFE	0,038	365,3	0,03
Elementos comerciales			1,21
Total			2,34

Costes por mano de obra (C_{Mo})

Actividad	Nº	Coste/ud (€)	Asignación (%)	Coste/ud (€)	Coste/ud (€)	Coste/ud (€)
Taller	8	18,11	100	18,11	20,37 (9 trab.)	20,37 (9 trab.)
Almacén	1	1,70	100	1,70	1,70	1,70
Ingeniería	1	3,17	100	3,17	3,17	3,17
Gestión	1	2,49	100	2,49	2,49	2,49
Total				25,47	27,73	27,73

Diseño inicial		
Producción: 6,25 ud/h		
Actividad	Nº	S_h (€/h)
Taller	8	113,19
Almacén	1	10,63
Ingeniería	1	19,81
Gestión	1	15,56
Total		159,19

Ciclo 1 de rediseño		
Producción: 7 ud/h		
Actividad	Nº	S_h (€/h)
Taller	9	142,6
Almacén	1	11,90
Ingeniería	1	22,19
Gestión	1	17,43
Total		194,1

Ciclo 2 de rediseño		
Producción: 7 ud/h		
Actividad	Nº	S_h (€/h)
Taller	9	142,6
Almacén	1	11,90
Ingeniería	1	22,19
Gestión	1	17,43
Total		194,1

Costes por consumo (C_{cons})

Coste/unidad (€/ud)	
Energía eléctrica	0,51
Consum. máquina	22,28
Acabado	2,65
Total	25,44

Coste/unidad (€/ud)	
Energía eléctrica	0,44
Consum. máquina	19,39
Acabado	2,32
Total	22,15

Coste/unidad (€/ud)	
Energía eléctrica	0,44
Consum. máquina	19,39
Acabado	3,44
Total	23,27

COSTES DE PRODUCCIÓN

Coste/unidad de producto (€)	
Materia prima	4,34
Mano de obra	25,47
Costes consumo	25,44
Costes indirectos	3,97
Amortización	2,03
Total	61,25

Coste/unidad de producto (€)	
Materia prima	2,88
Mano de obra	27,73
Costes consumo	22,15
Costes indirectos	3,47
Amortización	1,74
Total	58

Coste/unidad de producto (€)	
Materia prima	2,34
Mano de obra	27,73
Costes consumo	23,27
Costes indirectos	3,47
Amortización	1,74
Total	58,5

ANEXO C4 - Leche

Anexo C4 - 1. Características de la alimentación

En la Tabla C4.1 se muestran los componentes de diferentes mezclas para alimentación del ganado y las cantidades correspondientes de alimentos por vaca y día. En cada alimento se indica el porcentaje de humedad, de materia seca y de los principales nutrientes. Cada mezcla contiene los nutrientes adecuados que se requieren para la producción de leche.

Tabla AC4.1. Explotación láctea - Composición de diferentes mezclas para alimentación.

Materia prima	Cantidad (Kg)	Humedad	Materia seca	Fibra det. Ácida	Fibra det. neutra	Proteína	Ca	Mg	P
DISEÑO INICIAL									
Silo maíz	22	63%	37%	32,9%	50,9%	10,5%	0,20%	0,15%	0,18%
Pienso	10	20,51%	79,5%	2,71%	13,7%	11,7%	0,23%	0,60%	0,40%
Alfalfa	7	9,1%	90,9%	32,8%	42,9%	17,6%	1,71%	0,25%	0,27%
Total (Kg)	39	16,55	22,45	9,8	15,6	4,71	0,19	0,11	0,09
ALTERNATIVA 1									
Silo cebada	22	65%	35%	31,3%	54,2%	9,29%	0,45%	0,18%	0,26%
Pienso	10	20,5%	79,5%	2,71%	13,7%	11,7%	0,23%	0,60%	0,40%
Alfalfa	7	9,1%	90,9%	32,8%	42,9%	17,6%	1,71%	0,25%	0,27%
Total (Kg)	39	16,9	22,01	9,45	16,3	4,45	0,24	0,12	0,12
ALTERNATIVA 2									
Paja cebada	4	8%	92%	46,4%	67,1%	5,1%	0,30%	0,10%	0,07%
Pienso	14	20,5%	79,5%	2,71%	13,7%	11,7%	0,23%	0,60%	0,40%
Alfalfa	10	9,1%	90,9%	32,8%	42,9%	17,6%	1,71%	0,25%	0,27%
Total (Kg)	28	4,11	23,9	5,52	8,9	3,60	0,22	0,11	0,09

Se indican los datos que corresponden a las mezclas de alimentación inicial y de las dos alternativas propuestas. En la alternativa 2, se puede observar que la masa total de alimento se reduce considerablemente y que contiene un porcentaje de humedad mucho menor.

Anexo C4 - 2. Cálculo de indicadores ambientales

Los datos utilizados para el cálculo de indicadores han sido obtenidos de diferentes fuentes. Se han utilizado las Bases de Datos de la metodología MEEuP (**Kemna et al., 2005**), Agri-footprint y Probas (**UBA, 2007**) y el trabajo de **Hospidio et al (2002)** para obtener los datos relacionados con los productos de limpieza. En la Tabla C4.2 se enumeran los respectivos indicadores unitarios para cada una de las entradas del proceso. En este caso de estudio se calculan los siguientes indicadores: GWP₁₀₀ (Global Warming Potential), Ac (Acidificación) y Eu (Eutrofización).

Tabla AC4.2. Explotación láctea - Indicadores ambientales unitarios.

Entrada	GWP ₁₀₀ (Kg CO ₂ -eq/Kg)	Ac (g SO ₂ -eq/Kg)	Eu (g PO ₄ ³⁻ eq/Kg)	Base de datos
Paja cebada	0,15	$5 \cdot 10^{-4}$	$6 \cdot 10^{-5}$	Agri footprint
Silo maíz	0,35	$5,6 \cdot 10^{-3}$	$1,8 \cdot 10^{-4}$	Agri footprint
Silo cebada	0,53	$5,7 \cdot 10^{-3}$	$1,8 \cdot 10^{-4}$	Agri footprint
Pienso	0,36	$2,4 \cdot 10^{-3}$	$5,2 \cdot 10^{-3}$	Agri footprint
Alfalfa	0,63	$6,8 \cdot 10^{-3}$	$1,8 \cdot 10^{-3}$	Agri footprint
Agua	0	0	0	MEEuP
Productos limpieza	0,0029	$3,1 \cdot 10^{-5}$	$1,5 \cdot 10^{-5}$	Hospidio et al., (2002)
Gasóleo	75387	0,75	0,32	Probas
Electricidad (Kw·h)	0,35	$6,2 \cdot 10^{-4}$	0	Probas

A partir de los indicadores unitarios y de los datos obtenidos en el inventario de producción, se calculan los indicadores de impacto ambiental. El cálculo del impacto se puede dividir en dos bloques: el relacionado con la materia prima utilizada para elaborar las mezclas para alimentación y el relacionado con el consumo de otros materiales y el consumo de energía en las actividades de la explotación láctea.

En las siguientes tablas se muestran los indicadores ambientales calculados en cada uno de estos bloques. En la Tabla C4.3 los indicadores correspondientes al diseño inicial, en la Tabla C4.4 los indicadores obtenidos en el rediseño y en la Tabla C4.5 los indicadores calculados para la mezcla de alimentación planteada como alternativa. En cada caso, se desglosa el impacto por componentes. Se comprueba que la contribución al impacto de la materia prima utilizada en la alimentación es muy superior al que generan otros materiales y otros consumos. La propuesta de rediseño mejora notablemente los indicadores GWP₁₀₀ y Acidificación, pero produce un incremento del valor de Eutrofización.

Tabla AC4.3. Explotación láctea - Indicadores ambientales del diseño inicial.

Entrada	Masa (Kg)	GWP ₁₀₀ (Kg CO ₂ eq)	Ac (g SO ₂ eq)	Eu (g PO ₄ ³⁻ eq)
Silo de maíz	0,786	0,275	0,0044	0,00014
Pienso	0,357	0,129	0,0008	0,00185
Alfalfa	0,250	0,156	0,0017	0,00044
Agua	3,214	0	0	0
Mezcla de comida	Total	0,560	0,0069	0,00243
Productos de limpieza	0,0029	8·10 ⁻⁶	0	4·10 ⁻⁹
Paja	0,125	0,019	1·10 ⁻⁴	7,5·10 ⁻⁶
Agua	0,282	0	0	0
Electricidad	0,0705 Kwh	0,025	0	0
Gasóleo	l	0,039	0	2·10 ⁻⁷
Explotación	Total	0,083	1·10⁻⁴	2,1·10⁻⁷
TOTAL		0,643	0,007	0,0024

Tabla AC4.4. Explotación láctea - Indicadores ambientales del rediseño.

Entrada	Masa (Kg)	GWP ₁₀₀ (Kg CO ₂ eq)	Ac (g SO ₂ eq)	Eu (g PO ₄ ³⁻ eq)
Paja	0,143	0,021	0,0001	0,0000086
Pienso	0,5	0,180	0,0012	0,0025907
Alfalfa	0,357	0,223	0,0024	0,0006285
Agua	3,214	0	0	0
Mezcla de comida	Total	0,424	0,0037	0,003
Productos de limpieza	0,0029	8·10 ⁻⁶	0	4·10 ⁻⁹
Paja	0,125	0,019	1·10 ⁻⁴	7,5·10 ⁻⁶
Agua	0,282	0	0	0
Electricidad	0,0705 Kwh	0,025	0	0
Gasóleo	l	0,032	0	1·10 ⁻⁷
Explotación	Total	0,076	1·10⁻⁴	1,1·10⁻⁷
TOTAL		0,500	0,0038	0,003

Tabla AC4.5. Explotación láctea - Indicadores ambientales de la alternativa.

Entrada	Masa (Kg)	GWP ₁₀₀ (Kg CO ₂ eq)	Ac (g SO ₂ eq)	Eu (g PO ₄ ³⁻ eq)
Silo de cebada	0,7857	0,418	0,0045	0,00014
Pienso	0,357	0,129	0,0008	0,00185
Alfalfa	0,5	0,156	0,0017	0,00044
Agua	3,214	0	0	0
Mezcla de comida	Total	0,703	0,0070	0,00243

Anexo C4 - 3. Costes de producción

Diseño inicial

Costes de materia prima (C_{MP})

Material	Cant.	Ud.	Pr. (€/ud.)	C_{MPmat} (€)
Silo maíz	0,786	Kg	0,035	0,027
Pienso	0,357	Kg	0,27	0,096
Alfalfa	0,250	Kg	0,12	0,030
Agua	3,214	l	0,001	0,004
Total				0,158

Rediseño

Material	Cant.	Ud.	Pr. (€/ud.)	C_{MPmat} (€)
Paja	0,143	Kg	0,04	0,006
Pienso	0,5	Kg	0,27	0,135
Alfalfa	0,357	Kg	0,12	0,043
Agua	3,214	l	0,001	0,004
Total				0,188

Costes por mano de obra (C_{MO})

Actividad	Nº	Coste/unidad (€)	Asignación (%)	Coste/unidad (€)
Ganadero	1	0,072	100	0,072
Ayudante	1	0,046	50	0,023
Total				0,095

Actividad	Nº	S_h (€/h)
Ganadero	1	10,91
		10,91

Actividad	Nº	S_h (€/h)
Ganadero	1	12,86
Ayudante	1	4,11
Total		16,97

Costes por consumo (C_{cons})

Coste/unidad de producto (€)	
Energía eléctrica	0,012
Gasóleo	0,009
Prod. Limpieza	0,0057
Agua limpieza	0,0003
Salud	0,0088
Paja	0,005
Veterinario	0,017
Total	0,058

Coste/unidad de producto (€)	
Energía eléctrica	0,011
Gasóleo	0,007
Prod. Limpieza	0,0057
Agua limpieza	0,0003
Salud	0,0088
Paja	0,005
Veterinario	0,017
Total	0,055

Costes de amortización (C_{Am})

Coste/unidad de producto (€)	
Equipamiento	0,0002
Instalaciones	0,017
Máquinas	0,014
Total	0,032

Coste/unidad de producto (€)	
Equipamiento	0,0002
Instalaciones	0,017
Máquinas	0,014
Total	0,032

COSTES DE PRODUCCIÓN

Coste/unidad de producto (€)	
Materia prima	0,158
Mano de obra	0,072
Costes por consumo	0,058
Costes indirectos	0,025
Amortización	0,032
TOTAL	0,345

Coste/unidad de producto (€)	
Materia prima	0,188
Mano de obra	0,095
Costes de consumo	0,055
Costes indirectos	0,025
Amortización	0,032
TOTAL	0,395

INGRESOS

Ingreso/unidad de producto (€)	
Leche	0,3107
Venta vacas	0,015
Venta terneros	0,009
Subvenciones	0,015
Venta estiércol	0,049
TOTAL	0,399

Ingreso/unidad de producto (€)	
Leche	0,3107
Venta vacas	0,015
Venta terneros	0,009
Subvenciones	0,015
Venta estiércol	0,052
TOTAL	0,402

Anexo C4 - 4. Cálculo de la rentabilidad sobre activos

En este apartado se muestra el cálculo de la rentabilidad sobre activos de la explotación láctea a partir del beneficio obtenido y la inversión realizada en equipos, máquinas e instalaciones. En cada Tabla, se indica la inversión total realizada, el coste anual de la inversión para un periodo de amortización dado y el valor del activo los tres primeros años. A partir de la producción anual de leche, se obtiene el activo y la rentabilidad por litro producido. La rentabilidad media se obtiene, finalmente, como el promedio de las obtenidas en los tres primeros años.

En las Tabla AC4.6 se muestra el cálculo de la rentabilidad en el diseño inicial y en la Tabla AC4.7 el cálculo para el rediseño. Se observa que la rentabilidad disminuye en el rediseño debido a que el VA es menor.

Tabla AC4.6. Explotación láctea – Cálculo de RSA en diseño inicial.

Instalaciones	Periodo de amortización (años)	Inversión Coste Total (€)	Inversión Coste anual (€)	Año 1	Año 2	Año3
Equipamiento	15	1000	66,7	1000	933,3	866,7
Instalaciones	30	200000	6666,7	200000	193333,3	186666,7
Maquinaria	20	112500	5625	112500	106875	101250
Act_{maq}			12358,33	313500	301141,7	288783,3
Act _{maq} /litro				0,81	0,78	0,74
RSA/ litro				0,067	0,069	0,073
(Producción anual: 388360 litros)				Rentabilidad sobre activos (3 años) = 0,069		

Tabla AC4.7. Explotación láctea – Cálculo de RSA en rediseño.

Instalaciones	Periodo de amortización (años)	Inversión Coste Total (€)	Inversión Coste anual (€)	Año 1	Año 2	Año3
Equipamiento	15	1000	66,7	1000	933,3	866,7
Instalaciones	30	200000	6666,7	200000	193333,3	186666,7
Maquinaria	20	112500	5625	112500	106875	101250
Act_{maq}			12358,3	313500	301141,7	288783,3
Act _{maq} /litro				0,81	0,78	0,74
RSA/litro				0,009	0,009	0,010
(Producción anual: 388360 litros)				Rentabilidad sobre activos (3 años) = 0,009		

